



Ministère de l'enseignement supérieure
et de la recherche scientifique

Université Mohamed Boudiaf -
M'sila

Faculté de technologie

Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Matériaux

THEME

**L'influence des granulats artificiels « laitier » sur la
résistance mécanique du béton**

Dirigé par :

Dr. MENASRI. A

Présenté par :

NOUI Safwan

Promotion : 2015/2016.

Dédicaces

A **mon père** et mes **deux mères** qui m'ont toujours soutenu et m'ont

Permis d'arriver là où je suis aujourd'hui. Aucun mot

N'est assez fort pour vous témoigner toute ma

Reconnaissance, alors simplement **MERCI POUR**

TOUS, mais je suis sûr qu'au fond de vos cœurs vous

Savez combien je vous aime.

A mes frères, **Hicham** et **Anis**, A mes sœurs, **Asma** et **Marwa**

merci pour l'ensemble

des moments que nous passons ensemble.

A mes amis

Merci pour votre amitié précieuse.

A tous mes proches, qui m'ont

Toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.

Remerciements

Je remercie Dieu, le tout puissant, je rende grâce pour m'avoir donné santé, patience, volonté et surtout raison.

Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à mon encadreur, **Mr Menasri Abderrezak** pour avoir d'abord proposer ce thème, et lui exprime mon gratitude, pour la disponibilité et la patience dont il a fait preuve et dont les précieux conseils et les remarques pertinentes et pour son suivi continuél tout le long de la réalisation de ce mémoire dans les meilleures conditions.

Je tiens également à remercier l'ensemble des membres du jury qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail.

Je tiens à adresser mes vifs remerciements au Dr **Guchi Yazid**, pour son aide et conseil.

Je suis aussi redevable à, tous les enseignants du département de génie civil, ainsi qu'à **Monsieur Baali Laid**, chef du département de génie civil qui ont contribués à forger nos connaissances durant toutes ses années de formation. .

J'exprime ma profonde reconnaissance à mes parents, mes frères, mes sœurs ainsi que toute ma famille pour leurs encouragements et prières qui m'ont permis de finaliser ce travail.

Je remercie aussi mes amis qui m'ont toujours soutenue et encourager, **Hamoud, Salah surferbox, Ridha et Tayeb.....**

Enfin, j'exprime ma gratitude à tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à l'élaboration de ce travail.

Résumé

Les granulats occupent la première place parmi les matières premières qui composent le béton. La consommation des granulats naturels s'augmente avec l'augmentation de la quantité du béton. Considérant en fonction du développement durable, la confection du béton avec granulats recyclés du laitier devient une bonne solution au problème de développement harmonieux entre les ressources et l'environnement.

Mots clés : béton, granulats recyclés, laitier de haut fourneau, résistance mécanique.

Abstract:

The aggregates take the first place among the raw materials which form the concrete. The consumption of natural aggregates rises with the increase of the concrete's quantity. Considering, according the sustainable development, the preparation of concrete with the recycled aggregates of slag becomes a good solution of harmonious development between the resources and the environment.

Key words: concrete, recycled aggregates, slag of blast furnaces, mechanical resistance

المخلص:

تشغل الحصى مكانا مرموقا من بين المواد الأولية التي تشكل الخرسانة . و يرتفع استهلاك الحصى الطبيعية بارتفاع كمية الخرسانة . بالأخذ بعين الاعتبار و وفقا للتنمية المستدامة ، مزيج الخرسانة مع الفضلات المعاد تصنيعها، فتصبح بذلك حلا جيدا للتطوير المنسجم بين المصادر و البيئة.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة، الحصى المعاد تصنيعها، نفايات الفرن المنصهر، المقاومة الميكانيكية.

Tables de matière

Table des matières

Ministère de l'enseignement supérieure	1
et de la recherche scientifique.....	1
THEME.....	1
Dédicaces	i
Remerciements	i
Résumé.....	ii
Tables de matière	iv
Table de Figure	vi
Table des Tableaux	viii
Introduction générale :	1
I Etude des caractéristiques de laitier.....	3
I. 1. Introduction :	3
I. 2. Le laitier de haut fourneau :	3
I. 3. Historique sur la valorisation des laitiers :	3
I. 4. Production et utilisation du laitier	3
I. 5. Utilisation du laitier comme granulats	5
I. 6. Composition chimique de laitier	5
I. 7. Composition minéralogique du laitier granulé	6
I. 8. REACTIVITE DU LAITIER.....	8
I. 9. Valorisation des laitiers issus de haut Fournaux dans le béton.....	8
I. 10. PRESENTATION DU SOUS PRODUIT : LE LAITIER DU HAUT FOURNEAU	9
I.10.1. Refroidissent rapide à l'eau.....	10
I.10.2. Refroidissement rapide à l'air et à l'eau	11
I.10.3. Refroidissement lent à l'air	11
I. 11. QUALITE DU LAITIER GRANULE D'EL-HADJAR.....	12
I. 12. TRAITEMENT DU LAITIER GRANULE.....	13
I.12.1. PRODUCTION DU LES LAITIERS DE HAUT-FOURNEAU.....	14
I.12.2. Granulométrie	17
I.13	17
II. COMPOSITION DE BETON SUR LA BASE DE GRANULATS ARTIFICIELS 'LAITIER'	19
II. 1. Introduction.....	19
II. 2. Les Constituants Du Béton	19
II.2.1. Définition des granulats	19

II.2.2.	Ciment.....	22
II.2.3.	Eau de gâchage.....	25
II.2.4.	Rôle des différents éléments constituant le béton:	26
II. 3.	Propriétés des bétons:	26
II.3.1.	Le béton frais:	27
II.3.2.	Le béton durci:	28
II. 4.	La formulation de béton:.....	29
II.4.1.	Méthodes de Dreux Gorisse.....	29
II. 5.	Conclusion	33
III	: EXPERIMENTATION.....	35
III. 1.	Introduction.....	35
III. 2.	FORMULATION DES BETONS	35
III. 3.	Programme des essais effectués.....	37
III.3.1.	Mesures effectuées sur les éprouvettes	37
III. 4.	PRESENTATION DES RESULTATS	38
III.4.1.	La résistance mécanique à la compression.....	38
III.4.2.	La résistance mécanique à la traction par fendage	39
III.4.3.	La résistance mécanique à la traction par flexion	39
III. 5.	CONCLUSION	40
IV	RESULTATS ET DISCUSSION	42
IV. 1.	Introduction.....	42
IV. 2.	Représentation et analyses des résultats	42
IV.2.1.	La résistance mécanique à la compression.....	42
IV.2.2.	La résistance mécanique à la traction par fendage	45
IV.2.3.	La résistance mécanique à la traction par flexion	47
IV. 3.	Conclusion.....	48
	Conclusion générale.....	50
	Bibliographie.....	51
	Résumé.....	53

Table de Figure

Chapitre I :

FIGURE I- 1:HAUT FOURNEAU	4
FIGURE I- 2: REPRESENTATION DES PRINCIPAUX AJOUTS CIMENTAIRES DANS UN DIAGRAMME TERNAIRE. (BIJEN, 1996).	6
FIGURE I- 3: LES PARTICULES VITREUSES DE LAITIER EN BLANC. (AÏTCIN, 2001)	7
FIGURE I- 4: LES GRAINS DU LAITIER. (AÏTCIN, 1966)	7
FIGURE I- 5: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA PRODUCTION DE LAITIER DU HAUT FOURNEAU(AITCIN,2001)	9
FIGURE I- 6:LE LAITIER GRANULE.	11
FIGURE I- 7: LE LAITIER CRISTALLISE. (A : ROCHE) ET (B : CONCASSEE).	12
FIGURE I- 8: SCHEMA DE PRINCIPE D'UN HAUT FOURNEAU.	14
FIGURE I- 9: LAITIER DE HAUT FOURNEAU CRISTALLISE	15
FIGURE I- 10: LAITIER DE HAUT FOURNEAU VITRIFIE	16

Chapitre II :

FIGURE II- 1:LA COMPOSITION DU MELANGE DE BETON EN GRANULATS (SABLE, PIERRES CONCASSEES).	22
FIGURE II- 2 :ETAT DE L'EAU DANS LES C-S-H	26
FIGURE II- 3 : DOSAGE EN CIMENT	30
FIGURE II- 4 : LA COURBE GRANULAIRE DE REFERENCE	33

Chapitre III :

FIGURE III- 1: PROCESSUS DU DURCISSEMENT DU BETON.	38
--	----

Chapitre IV :

FIGURE IV- 1 :HISTOGRAMME DE LA RESISTANCE DU (B.O.G.N) A LA COMPRESSION EN FONCTION DU TEMPS (MILIEU SEC)	42
FIGURE IV- 2 :HISTOGRAMME DE LA RESISTANCE DU (B.O.G.L) A LA COMPRESSION EN FONCTION DU TEMPS (MILIEU SEC)	43

FIGURE IV- 3 : COURBES DE LES RESISTANCES DES (B.O.G.N ET B.O.G.L) A LA COMPRESSION EN FONCTION DU TEMPS (MILIEU SEC)	43
FIGURE IV- 4 : HISTOGRAMME DE LA RESISTANCE DU (B.O.G.N) A LA COMPRESSION EN FONCTION DU TEMPS (MILIEU HUMIDE)	44
FIGURE IV- 5 : HISTOGRAMME DE LA RESISTANCE DU (B.O.G.L) A LA COMPRESSION EN FONCTION DU TEMPS (MILIEU HUMIDE)	44
FIGURE IV- 6 : COURBES DE LES RESISTANCES DES (B.O.G.N ET B.O.G.L) A LA COMPRESSION EN FONCTION DU TEMPS (MILIEU HUMIDE)	45
FIGURE IV- 7: HISTOGRAMME DE LA RESISTANCE DU (B.O.G.N) A LA TRACTION PAR FENDAGE EN FONCTION DU TEMPS	45
FIGURE IV- 8 : HISTOGRAMME DE LA RESISTANCE DU (B.O.G.L) A LA TRACTION PAR FENDAGE EN FONCTION DU TEMPS	46
FIGURE IV- 9 : COURBES DE LES RESISTANCES DES (B.O.G.N ET B.O.G.L) A LA TRACTION PAR FENDAGE EN FONCTION DU TEMPS	46
FIGURE IV- 10: HISTOGRAMME DE LA RESISTANCE DU (B.O.G.N) A LA TRACTION PAR FLEXION EN FONCTION DU TEMPS	47
FIGURE IV- 11 : HISTOGRAMME DE LA RESISTANCE DU (B.O.G.L) A LA TRACTION PAR FENDAGE EN FONCTION DU TEMPS	47
FIGURE IV- 12 : COURBES DE LES RESISTANCES DES (B.O.G.N ET B.O.G.L) A LA TRACTION PAR FLEXION EN FONCTION DU TEMPS	48

Table des Tableaux

Chapitre I :

TABLEAU I- 1 : COMPOSITION CHIMIQUE DES DIFFERENTS TYPES DES LAITIERS DE HAUT FOURNEAU.	5
TABLEAU I- 2: COMPOSITION CHIMIQUE DU LAITIER	12
TABLEAU I- 3: CLASSIFICATION DU LAITIER D'EL-HADJAR	13
TABLEAU I- 4: COMPOSITION CHIMIQUE D'UN LAITIER DE HAUT FOURNEAU	15

Chapitre II :

TABLEAU II- 1: LES DIFFERENTS CIMENTS ET LES PROPORTIONS EN MASSE DE LEURS CONSTITUANTS. LES CONSTITUANTS MARQUES D'UNE ETOILE SONT SECONDAIRES (MOINS DE 5 %).	24
TABLEAU II- 2 : CLASSES EN FONCTION DE LA RESISTANCE NORMALE A 28 JOURS	25

Chapitre III :

TABLEAU III- 1: LES CONSTITUANTS DES DIFFERENTS BETONS EN MASSE (KG/M3).	36
TABLEAU III- 2: LES CONSTITUANTS DES DIFFERENTS BETONS EN VOLUME (%)	36
TABLEAU III- 3: RESISTANCE MECANIQUE A LA COMPRESSION (MILIEU SEC)	39
TABLEAU III- 4: RESISTANCE MECANIQUE A LA COMPRESSION (MILIEU HUMIDE)	39
TABLEAU III- 5: RESISTANCE MECANIQUE A LA TRACTION PAR FENDAGE	39
TABLEAU III- 6: RESISTANCE MECANIQUE A LA TRACTION PAR FLEXION	40

Introduction générale :

Cadre général

Le développement dans la construction des bâtiments et d'ouvrages de Génie Civil à provoquer, durant ces deux dernières décennies, un accroissement considérable dans la consommation de granulats normaux et légers. En Algérie, plus de mille unités produisent annuellement 68 millions de tonnes de granulats.

Les premiers granulats légers utilisés pour la réalisation de bétons ont été des granulats naturels issus de roches volcaniques. Puis, des granulats légers artificiels ont été fabriqués dès 1917 aux USA à partir des matières premières naturelles comme les laitiers qui comprennent les laitiers d'aciérie, les laitiers métallurgiques et les laitiers de haut fourneau. Seulement ce dernier type est utilisé pour des bétons légers.

Les laitiers de hauts fourneaux sont des résidus minéraux de la préparation de la fonte dans les hauts fourneaux à partir du minerai et du coke métallurgique. Ils contiennent de la chaux (45 à 50%), de la silice (25 à 30%), de l'alumine (15 à 20%) et environ 10% de magnésie.

L'utilisation du laitier de haut fourneau présente un intérêt économique et technique dans le domaine de la construction. Le laitier peut non seulement améliorer les propriétés rhéologiques mais aussi augmenter significativement les performances mécaniques et la durabilité à long terme du béton.

Objectif du mémoire

L'étude entreprise dans ce travail est d'exploiter les résidus industriels: le Laitier d'El-Hadjar existant en Algérie pour produire du béton présentant des intérêts incontestables du point de vue technique, économique, écologique et du point de vue durabilité. Des tests de rhéologie sur le béton frais et des tests de résistance mécanique sur le béton durci sont réalisés. Les résultats obtenus montrent que les bétons à base de laitier diminuent sensiblement l'ouvrabilité et les résistances mécaniques à court terme par contre, à long terme, de bonnes résistances mécaniques sont obtenues.

L'objectif de notre travail est de mettre en évidence la possibilité de valoriser le laitier d'El-Hadjar comme granulats pour béton par des essais de résistance mécanique.

La production annuelle de laitier est de 680443 tonnes, ce dernier est un sous produit de la fabrication de la fonte au complexe sidérurgique. Dont 260000 tonnes sous forme de laitier granulé, qui ne trouve pas de réelle utilisation. Ce laitier est stocké sur des sites agricoles portant ainsi préjudice à l'équilibre écologique de l'environnement.

Chapitre I :

Etude des caractéristiques de laitier

I Etude des caractéristiques de laitier

I. 1. Introduction :

Le problème des sous-produits et déchets industriels est l'un des problèmes majeurs de notre civilisation industrielle, et l'avenir même de cette civilisation est largement conditionné par les solutions que nous pourrions apporter à ce problème. A cet effet, les travaux de Génie Civil, présentent des possibilités intéressantes pour la valorisation de ces sous-produits et déchets qui doivent être exploitées en profondeur.

I. 2. Le laitier de haut fourneau :

Le laitier des hauts fourneaux est un sous-produit de la production de la fonte dans les hauts fourneaux obtenue à partir du minerai et du coke métallurgiques.

Une importante production de laitier est enregistrée annuellement. Le stockage de ce laitier sous forme de collines artificielles, a posé de graves problèmes écologiques notamment la stérilisation des terres agricoles riches et la défiguration des sites.

Il est de ce fait urgent de valoriser ce sous-produit en l'utilisant judicieusement dans le Génie Civil.

I. 3. Historique sur la valorisation des laitiers :

Dussar rapporte que, Belidor et Svab recommandaient dès le XVIII^e siècle, le laitier broyé comme masse d'addition au mortier de chaux. Au XIX^e siècle, Vicat avait entrevu les propriétés hydrauliques de ce produit, et ce n'est qu'en 1862 que Hangen a pu confirmer ces propriétés par des essais effectués en Allemagne.

Au début du XX^e siècle une première utilisation du ciment au laitier a été entreprise en Allemagne, puis en France. Mais ce n'est qu'après la première guerre mondiale, suite à un usage massif en travaux maritimes, que le ciment au laitier a été utilisé en grande quantité.

L'utilisation du laitier granulé dans le béton a commencé à la fin de 1950 dans plusieurs pays (Australie, Japon, Canada, etc...), tandis que son utilisation dans les constructions routières n'a commencé qu'en 1960 en France.

I. 4. Production et utilisation du laitier

Le laitier de haut fourneau résulte de la réduction du minerai de fer dans le processus de fabrication de la fonte. La figure suivante montre de façon schématique le procédé d'obtention du laitier.

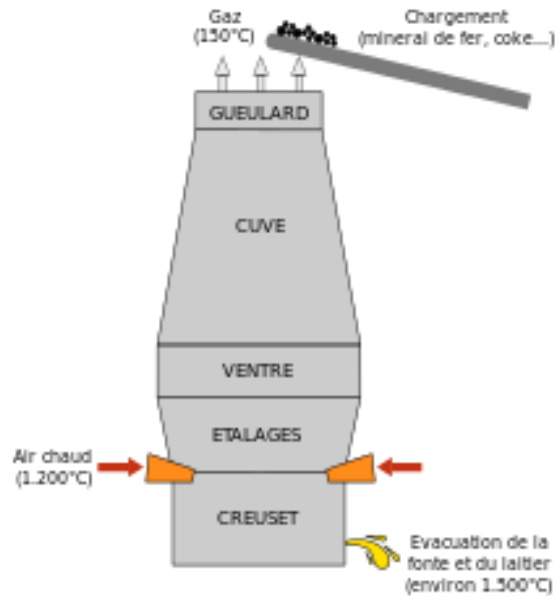


Figure I- 1:haut fourneau

A la partie inférieure du haut fourneau, et suite à la différence de leur masse volumique, le laitier flotte à la surface de la fonte en fusion. Les deux produits sont par la suite périodiquement coulés à une température de 1500 °C. En ouvrant l'orifice inférieur ou supérieur du four on obtient respectivement le coulage de la fonte ou du laitier.

Suivant le mode de refroidissement on distingue trois catégories de laitier :

a) Le laitier coulé en fosse ou cristallisé

Ce laitier est refroidi lentement à l'air libre jusqu'à durcissement. Après extraction et concassage, il sera utilisé comme granulats. Ce laitier ne possède aucune propriété hydraulique et ne peut être employé en cimenterie comme adjuvant actif.

b) Le laitier vitrifié

Le refroidissement brusque par un courant d'eau froide transforme le laitier liquide en un granulats fins d'où le nom de laitier granulé, qui sera utilisé comme ajout au liant ou comme liant hydraulique.

C) le laitier boulette

Une autre forme de production a été développée et consiste en un boulettage du laitier, qui donne d'une part un granulats légers et d'autre part sable 0-3 mm pouvant être utilisé dans la fabrication des liants hydrauliques.

I. 5. Utilisation du laitier comme granulats

Le laitier rocheux, après concassage peut être utilisé comme granulats dans les bétons. Le laitier bouleté entre dans la composition des bétons légers, alors que le laitier granulé peut être utilisé comme sable.

I. 6. Composition chimique de laitier

Les caractéristiques chimiques des laitiers peuvent être élucidées en considérant le diagramme de fusion du système ternaire Ca-Al₂O₃-SiO₂ (C-A-S), appelé diagramme de Rankin et Wright.

La composition chimique du laitier varie suivant le rapport pondéral de chargement du haut fourneau en minerai, coke et fondant en général. On distingue deux sortes de laitier : le laitier basique et le laitier acide.

Cette composition chimique est susceptible de se changer au cours des années selon le type du minéral, avec l'épuisement des sources.

Le tableau 2.2 présente la variation de la teneur des oxydes majeurs et mineurs dans le laitier suivant ses types. (Behim, 2003) et (Aïtcin, 2001)

Constituants	Laitier Français	Laitier nord Américain	Laitier Algérien	
			1995	2000
<i>SiO₂</i>	29 à 36	33 à 42	39.30	40.07
<i>Al₂O₃</i>	13 à 19	10 à 16	08.20	6.00
<i>CaO</i>	40 à 43	36 à 45	39.40	42.15
<i>Fe₂O₃</i>	< 4 %	0.3 à 20	00.00	2.03
<i>MgO</i>	< 6 %	3 à 12	6.00	4.68
<i>S</i>	< 1.5 %	-	0.07	0.15
<i>TiO₂</i>	-	-	2.35	2.64
<i>MnO</i>	-	-	-	1.07
<i>K₂O</i>	-	-	-	1.16

Tableau I- 1 : Composition chimique des différents types des laitiers de haut fourneau.

La composition du laitier est présentée sur le même diagramme ternaire utilisé pour définir la composition du ciment portland et autres ajouts cimentaires indiquée à la figure 1.2.

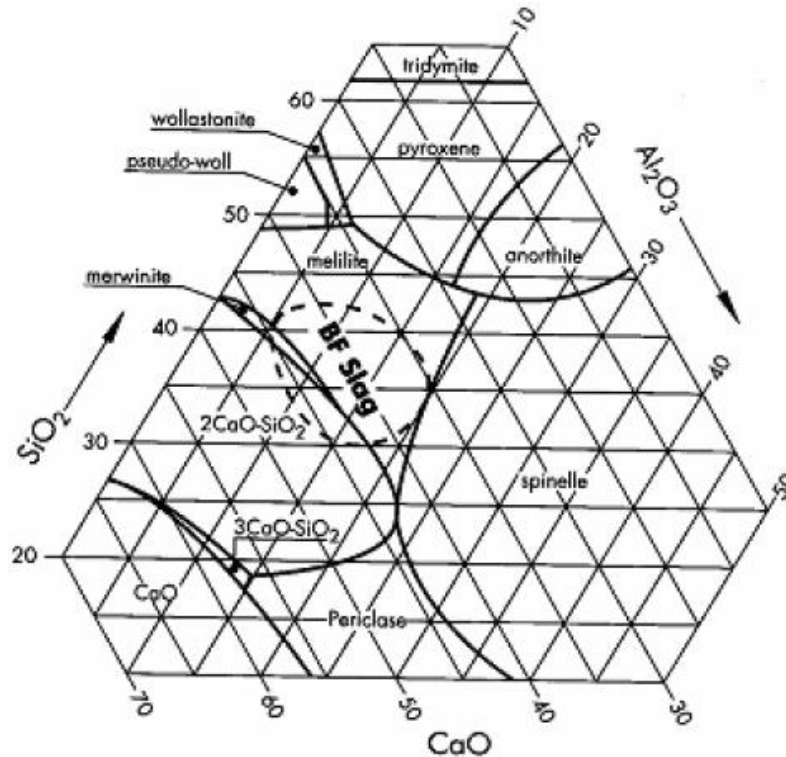


Figure I- 2: représentation des principaux ajouts cimentaires dans un diagramme ternaire. (Bijen, 1996).

I. 7. Composition minéralogique du laitier granulé

Le laitier granulé est un verre (la teneur en verre dépasse 90 %), il est considéré comme un liquide rapidement refroidi (super cooled liquids). La rapidité du refroidissement est une caractéristique des silicates fondus pour acquérir la forme des verres.

Le passage de l'état liquide à l'état solide est accompagné par un arrangement des molécules, qui prennent une orientation bien définie dans les cristaux. (Léa, 1971).

Si le refroidissement du laitier est rapide, les groupes moléculaires conservent en majorité leur disposition irrégulière (arrangement irrégulier), et la viscosité augmente rapidement au fur et à mesure que la température baisse, et le laitier passe de l'état liquide à un autre solide mais sans développement de la structure cristalline.

Les verres sont instables et ont tendance à passer à une forme cristalline, cette tendance est due à la haute viscosité des verres qui réduit la mobilité des molécules.

Examinée au microscope la poudre du laitier granulé présente des grains transparents clairs isotropiques désignant le verre et une zone noire (pour un laitier mal granulé) qui présente le début de la cristallisation.

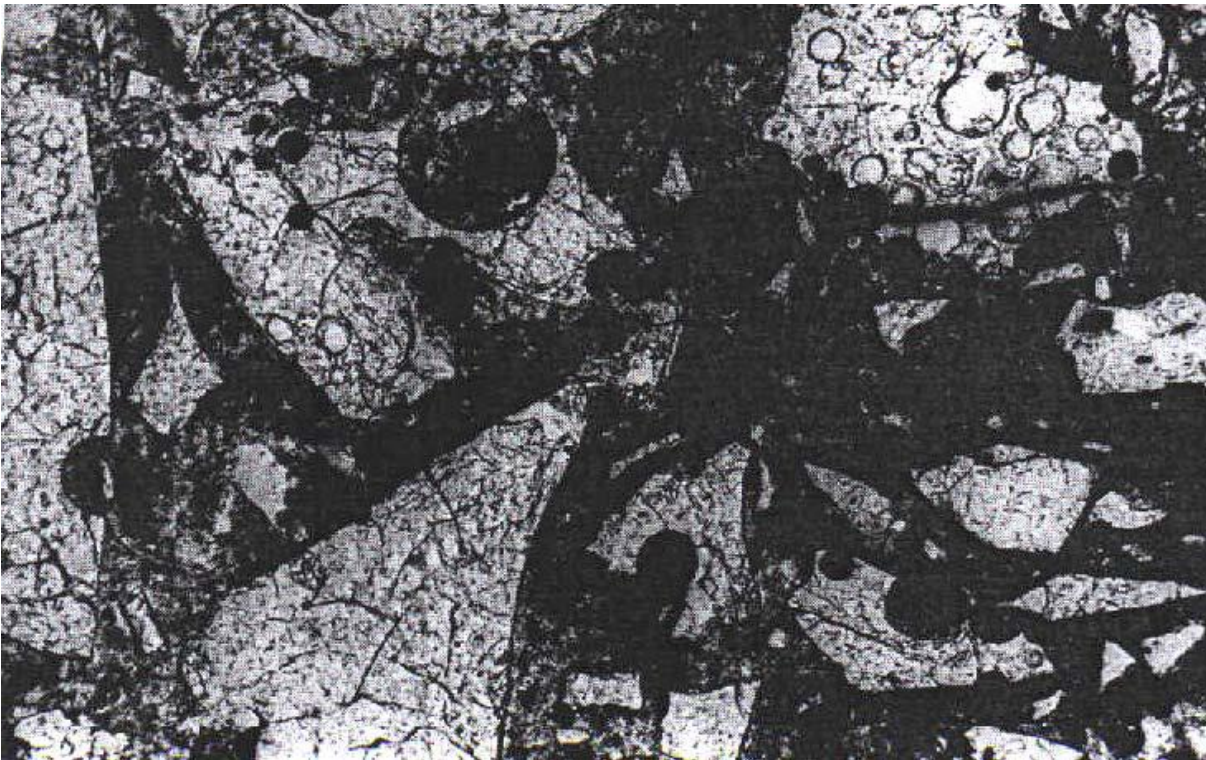


Figure I- 3: Les particules vitreuses de laitier en blanc. (Aïtcin, 2001)

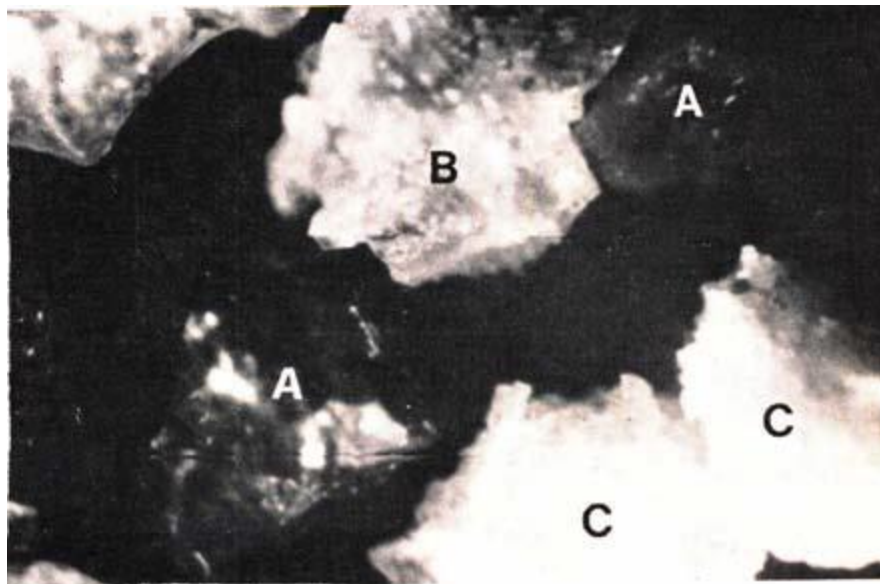


FIG. 18. — Grains de laitier granulé vitreux.
A: grains noirs ; B: grains gris ; C: grains jaunes.

Figure I- 4: Les grains du laitier. (Aïtcin, 1966)

I. 8. REACTIVITE DU LAITIER

La granulation du laitier du haut fourneau procure aux laitiers une activité complémentaire, l'état vitreux est une caractéristique essentielle liée aux propriétés hydrauliques du liant, ce qui traduit l'utilisation du laitier granulé finement broyé comme un ajout cimentaire.

La relation entre la composition chimique, la structure et l'activité hydraulique du laitier, fait l'objet de plusieurs études. Ces études ont montré que l'activité du laitier dépend essentiellement de sa structure, qui dépend elle aussi de la composition chimique et du traitement thermique effectué.

I. 9. Valorisation des laitiers issus de haut Fournaux dans le béton

La valorisation des résidus en Génie Civil, permet de résoudre les problèmes qui se posent sur le plan écologique et la pollution de l'environnement. Elle offre une solution économique en évitant l'extraction de la matière première donc préservation des sites.

L'activité économique, notamment la construction, a connu, en Algérie, ces dernières décennies, un développement exceptionnel. Cependant cette expansion connaît hélas d'énormes difficultés en termes de disponibilités de matériaux particulièrement les agrégats.

La valorisation des déchets et sous-produits industriels dans le Génie Civil ne peut que donner des résultats encourageants aussi bien en termes d'économie, d'écologie, que de comportement.

On peut définir un sous-produit comme étant un résidu obtenu au cours de la production d'un produit principal, par exemple, le laitier des hauts Fournaux est un sous-produit de la production de la fonte.

Dans les pays industrialisés, les résidus valorisés dans le domaine du Génie Civil sont les suivants :

- Le laitier des hauts Fournaux, qui est utilisé en cimenterie, en construction routières, et comme granulats (sable et gravier).
- Les cendres volantes, qui sont des sous-produits des centrales thermiques ou bien des déchets de combustion du charbon, qui sont utilisées dans les cimenteries.
- Les déchets de l'industrie de papier, utilisés dans les constructions de bâtiments (briques).
- Les sulfates résiduels valorisés dans les constructions routières.
- Le soufre, qui est un résidu provenant de la sulfuration des gaz naturels, est utilisé dans les mélanges au bitume et liants pour béton ou mortier.

L'Algérie dispose d'une quantité énorme de déchets et sous-produits industriels. A titre d'exemple, on peut citer le laitier, les scories, et le phospho-gypse, dont la valorisation est loin d'être satisfaisante.

Valorisation du laitier en Algérie.

L'utilisation des produits de laitier en Algérie est limitée à quelques rares applications malgré sa production progressant (500.000 tonnes/an). (Behim, 2003)

En cimenterie, il entre comme un ajout secondaire ne dépassant pas 20 % (cette substitution est faite seulement dans quelques cimenteries). (Nacéri, 2005)

Et en travaux routiers : A titre d'exemple, le laitier granulé a trouvé une utilisation dans la réalisation de la liaison autoroutière Annaba – Berrahal, où la couche de fondation été réalisée par une grave laitier tout laitier.

Des études intéressantes et récentes ont montré la possibilité d'utiliser les laitiers Algériens (d'El-Hadjar) pour :

- La fabrication des briques silico calcaires à base du laitier. (Arabi, 1996)
- La fabrication du béton cellulaire autoclavé. (Belouettar, 2003)
- La fabrication d'un ciment de laitier activé sans clinker. (Mezghiche, 1989)

I. 10. PRESENTATION DU SOUS PRODUIT : LE LAITIER DU HAUT FOURNEAU

Les laitiers du haut fourneau sont des co-produits de la fabrication de la fonte des usines sidérurgiques (la production des laitiers est liée à celle des fontes).

Ils sont formés par la majeure partie de la gangue du minerai de fer et par la majeure partie des impuretés du coke et des fondants ajoutés, ce qui est illustré à la figure 1.4 :

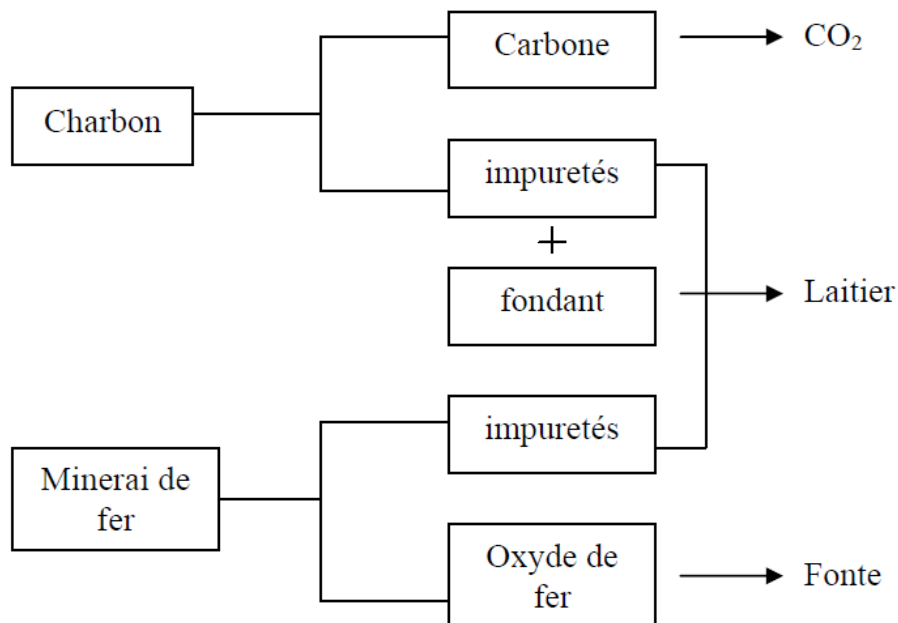


Figure I- 5: représentation schématique de la production de laitier du haut fourneau (Aitcin,2001)

Les minerais de fer sont des roches sédimentaires qui contiennent une forte proportion d'oxyde de fer, mélangés à d'autres éléments minéralogiques extrêmement divers, mais dans lesquels dominent

toujours où bien des roches siliceuses, où bien des roches calcaires, en outre très fréquemment de l'alumine où de la manganèse, sous forme diverses, sont associées à la silice et à la chaux dans la gangue des minerais, d'où le laitier obtenu est composé de silicates et aluminates de chaux et d'autres bases.

En fusion, (vers 1500°C) la partie inférieure du haut fourneau, recueille deux liquides :

- La fonte plus lourde (densité : 7).
- Le laitier, plus léger surnageant la fonte (densité 2,7 à 2,8).

A la sortie du haut fourneau, le laitier peut être traité de différentes façons :

I.10.1. Refroidissement rapide à l'eau

C'est la granulation du laitier : qui consiste à mettre brusquement le laitier liquide, en contact avec l'eau, afin de conserver le laitier à l'état vitreux (la cristallisation des laitier commence en effet vers 800 – 850°C).

On fait tomber le courant du laitier sortant du haut fourneau sur une forte arrivée d'eau, la masse du laitier se divise en grains d'un diamètre allant jusqu'à 5 mm environ et qui se solidifient aussitôt (il faut 3 à 10 m³ d'eau pour granulé une tonne de laitier). Le laitier perd une partie de son eau (qui peut atteindre 30 %) dans les bassins à fonts filtrants, puis il est repris pour être stocké.

Le laitier granulé se présente donc sous la forme de petits grains arrondis assez légers (densité apparente s'échelonne de 0,7 à 1,4) poreux de couleur terne (grisâtre ou jaunâtre selon les laitiers). Il est une sorte de verre (la teneur de verre dépasse les 90 % et atteint parfois 100 %), se qui est illustré à la figure 1.5.

La granulation à l'eau de mer est possible (mais les laitiers contiennent alors un peu de sel). (Venuat, 1984) et (Venuat, 1989)



Figure I- 6:Le laitier granulé.

I.10.2. Refroidissement rapide à l'air et à l'eau

C'est le bouletage : qui consiste à cisailer une nappe de laitier par des jets d'eau et à projeter le mélange obtenu dans l'air par centrifugation sur un tambour tournant (0,6 à 1 m³d'eau par tonne de laitier).

Les grains obtenus ont une granulométrie qui s'échelonne de 1 à 25 mm. Les grains inférieurs à 3mm sont presque entièrement vitreux. Les gros grains, légers, ont un cœur plus au moins cristallisé. Les masses volumiques apparentes varient suivant la granulométrie de 750 à 1000kg/m³.

I.10.3. Refroidissement lent à l'air

Le laitier liquide contenu dans des poches de 8 à 10 m³ est déversé en couches parallèles de 5 à 10 cm d'épaisseur (hauteur de 2 à 3 m), il se refroidit lentement et se cristallise formant des blocs prêts au concassage à la granulométrie voulue. Une fois concassé, il constitue un granulat artificiel dont les caractéristiques sont importantes.

Un tel laitier est représenté à la figure 1.7.



Figure I- 7: Le laitier cristallisé. (Roche) et (concassée).

COMPOSITION CHIMIQUE

Un refroidissement lent du laitier en fusion transforme celui—ci en un solide stable formé de silicates de calcium (Ca), d'aluminium (Al) , magnesium (Mg) , principalement de méililite, qui est une solution solide de gehlenite ((CaO Al₂O₃ SiO₂) et d' akermanite ((CaO)₂ MgO (SiO₂)). Le laitier cristallin a des propriétés mécaniques similaires à celles du basalte et est utilisé comme agrégat. Il contient aussi de la merwinite((CaO) MgO (SiO₂)) pour les laitiers basiques et la diopside (CMS) pour les laitiers acides. En ce qui concerne les composants mineurs, le laitier contient de la rankinite (C S), de la pseudo—wallastonite (C₃S₂), de l'oldamite (C A S) , de la monticellite (CMS) et du silicate dicalcique (C S), où C, M et S représentent les oxydes CaO, Mgo et Sio il est à noter que les deux composants mineurs , la monticellite et le silicate dicalcique , sont présents uniquement dans les laitiers acides.

La composition chimique du laitier d'El-Hadjar est donnée au tableau 1.2.

I. 11. QUALITE DU LAITIER GRANULE D'EL-HADJAR

Le laitier d'El-Hadjar comme l'indique le tableau 1.2

Elément	<i>sio₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>SO₃</i>	<i>KO₂</i>	<i>Na₂o</i>	<i>PF</i>	<i>MnO</i>
%	42.2	5.85	1.9	42.2	4.72	1.54	0.43	0.12	0.8	1.8

Tableau I- 2: Composition chimique du laitier

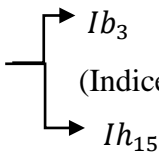
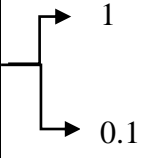
indice	valeu	qualité du
Ih_8 (Indice de Keil Allemagne)	1. 14	laitier normal
Ih_{13} (Indice de Cleret et Lagavant France)	13.97	laitier médiocre
 (Indices adoptes actuellement en France)		Laitier très médiocre
Ih_3 (Japon)	1.2	laitier très médiocre
Ih_{11} (URSS)	0.98	laitier à la limite

Tableau I- 3: classification du laitier d'El-Hadjar

Selon ces indices, le laitier d'El-Hadjar est de qualité médiocre du point de vue hydraulité. Cependant, il faut préciser que pour les ciments au laitier (CPA plus laitier) ces indices d'hydraulité ne suffisent pas pour caractériser leur qualité hydraulique. En effet, la qualité de ces ciments dépend du pourcentage de substitution du clinker par du laitier et de la qualité du clinker. Le faible pouvoir hydraulique du laitier pourra être compensé par un clinker hautement réactif.

Pour une appréciation, seuls les essais. De la résistance et de la durée de prise (essais mécaniques) sur ces ciments sont en mesure de les classer d'une façon plus exacte.

Dans la mesure où ces essais confirment. La médiocrité de l'hydratation du laitier d'El-Hadjar, une solution technique pour l'amélioration de cette qualité est possible à réaliser.

Etant donné que, la composition chimique du laitier varie d'une coulée à une autre lors de sa production, une amélioration de sa qualité hydraulique est obtenue par un bon ajustement dans sa composition chimique. En effet. Les indices d'hydraulité donnés dans le paragraphe 2.5 dépendent essentiellement de la composition chimique de l'élément.

Un tel changement dans la composition chimique du laitier est obtenu, d'une part par un bon réglage pondéral du chargement de haut fourneau en coke, minerais et fondant comme il a été indiqué au chapitre 2, paragraphes 2.4, 2.5 et 2.6 ; et d'autre part une bonne vitrification lors de l'opération de refroidissement.

I. 12. TRAITEMENT DU LAITIER GRANULE

Le traitement du laitier granulé utilisé dans les expériences comporte les étapes suivantes:

- a) Séchage dans une étuve à 105°C pendant 24 heures

b) Après un léger broyage durant 5 minutes on procède à une séparation magnétique (extraction du fer), par un séparateur magnétique.

c) Broyage jusqu'à une finesse de $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ dans un broyeur à boulets. Les mesures de la surface spécifique Blaine (SSB) sont effectuées en prélevant un échantillon toutes les heures.

Les résultats de mesure de la surface spécifique Blaine sont illustrés sur la figure 3. 1. On constate que le laitier granulé est relativement dur par rapport au clinker. En effet le temps de broyage du laitier jusqu'à une finesse de $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ est relativement long. Il varie entre 7 à 8 heures.

I.12.1. PRODUCTION DU LES LAITIERS DE HAUT-FOURNEAU

La production d'une tonne de fonte génère 250 à 300 kg de laitier de haut fourneau. Pour l'élaboration de la fonte, le haut-fourneau (Figure 1-8) est alimenté par un mélange de minerai de fer, de coke et de chaux. De l'air chaud (à $1200 \text{ }^\circ\text{C}$) est ensuite insufflé dans la tuyère et provoque la combustion du coke. Des réactions d'oxydation et de réduction ont lieu et il se forme de la fonte et un liquide essentiellement chargé d'oxydes. Ce résidu est appelé laitier de haut fourneau.

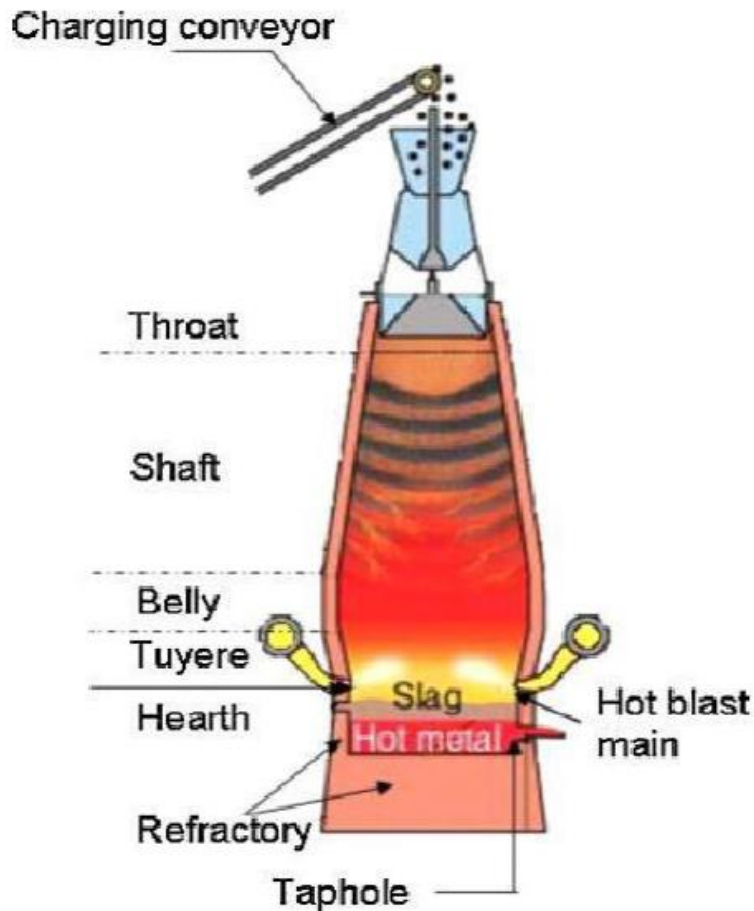


Figure I- 8: schéma de principe d'un haut fourneau.

Chapitre I : Etude des caractéristiques de laitier

Suivant le mode de refroidissement utilisé, on distingue le laitier de haut fourneau cristallisé et le laitier de haut fourneau vitrifié. Ces différents types de laitier ont une composition chimique presque identique (tableau 1-4) mais des propriétés physiques et des domaines d'application et de performance différents.

Elément	<i>CaO</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>MgO</i>	<i>SO₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>TiO₂</i>	<i>Na₂O</i>	<i>K₂O</i>	<i>P₂O₅</i>	<i>MnO</i>
Teneur moyenne(%)	43,7	33,3	12,4	8,3	3,0	0,9	0,6	0,3	0,3	0,2	0,1

Tableau I- 4: Composition chimique d'un laitier de haut fourneau



Figure I- 9: Laitier de haut fourneau cristallisé



Figure I- 10: laitier de haut fourneau vitrifié

Le Laitier de haut fourneau cristallisé (Figure 1-9) est obtenu par refroidissement lent à l'air qui permet sa cristallisation sous forme de roche artificielle dure, de couleur grise et d'aspect poreux. Sa granulométrie avant concassage est de 0/300 mm. Sa densité varie de 1,2 à 1,4. Ce laitier développe une résistance mécanique élevée (130 à 180 MPa en compression simple sur cube) et une bonne résistance à la fragmentation (son coefficient micro-deval varie de 25 à 30). Le laitier de haut fourneau cristallisé est fortement valorisé comme granulats pour bétons, granulats pour enrobés bitumineux ou granulats pour graves traitées au liant hydraulique artificiel. Son utilisation est régie par les normes P 18-302 et XP P 18-545.

Le laitier de haut fourneau vitrifié (granulé ou bouleté) (Figure 1-10) est quant à lui obtenu par un arrosage sous haute pression du laitier en fusion (trempe). Il se présente sous forme de sable jaune ou beige (granulométrie 0/8 mm). Sa caractéristique la plus marquante est sa réactivité (hydraulicité), c'est-à-dire sa capacité à faire prise en présence d'eau. En dehors de son utilisation, de plus en plus rare, comme sable dans le béton (Norme NF P 18-306), le laitier de haut fourneau vitrifié est largement utilisé comme addition sous forme moulue dans le béton (Norme NF EN 15167) et comme liant hydraulique routier (Norme EN 14227-2). Il est également utilisé, en remplacement du clinker, dans la production des ciments CEM II et CEM III (Norme NF EN 197-1).

I.12.2. Granulométrie

Au laboratoire, l'analyse granulométrique est faite suivant la norme EN 933-1 « Détermination de la granularité – Analyse granulométrique par tamisage ». Une mauvaise granulométrie des granulats a une incidence sur l'ouvrabilité du béton et favorise l'apparition d'une ségrégation dans ce dernier. C'est pour cela que la norme EN 12620 « granulats pour bétons » spécifie les caractéristiques générales de granularité et de forme que doivent respecter les gravillons. Comme les granulats de laitier EAF inox et AOD stabilisés sont concassés, une tranche granulométrique étroite (4/22,4 mm) en conformité avec le fuseau de spécificité recommandée par la norme EN 12620 «Granulats pour béton », a donc été choisie pour l'étude .Elles sont également continues.

I.13 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à une brève recherche bibliographique relative aux caractéristiques de laitier.

Tout comme dans le cas des autres industries, le besoin universel de conserver les ressources, de protéger l'environnement doit nécessairement se faire ressentir dans le domaine de la technologie du béton. Par conséquent, nous devons accorder beaucoup d'importance à l'usage de déchets et de sous-produits pour la fabrication du ciment et du béton. Les sous-produits peuvent être utilisés comme constituant principal du clinker ou comme granulats pour le béton.

Le laitier de haut fourneau est l'un des sous-produits sidérurgiques, qui ont le meilleur potentiel étant donné leurs propriétés très recherchées telles que leur solidité, leur résistance mécanique, leur forme, leur résistance à l'abrasion et leur granulométrie. Le laitier granulé s'obtient par refroidissement brusque par un courant d'eau (jet d'eau), ce qui permet de freiner le processus de cristallisation et d'obtenir ainsi, un matériau vitrifié et granulé. Ce mode de refroidissement transforme le laitier liquide en un granulat fin (procédé ou mode de granulation du laitier) à grains déchiquetés de dimensions inférieures à 5 mm. Notre travail traite la possibilité d'employer le laitier comme granulats du béton, application qui est particulièrement prometteuse du fait que 75% du béton est constitué de granulats.

Chapitre II :
composition de béton
sur la base
de granulats artificiels
‘laitier’

II. COMPOSITION DE BETON SUR LA BASE DE GRANULATS ARTIFICIELS 'LAITIER'

II. 1. Introduction

Ce chapitre décrit les matières employées dans tout ce programme de recherche:

A savoir: Ciment, laitier, sable, gravier, et eaux de gâchage.

II. 2. Les Constituants Du Béton

II.2.1. Définition des granulats

Le granulat est constitué d'un ensemble de grains minéraux qui selon sa dimension (comprise entre 0 et 125 mm) se situe dans l'une des 7 familles suivantes : – fillers ;

- sablons ;
- sables ;
- graves ;
- gravillons ;
- ballast ;
- enrochements.

Comme les trois quarts du volume d'un béton sont occupés par les granulats, il n'est pas étonnant que la qualité de ces derniers revête une grande importance. Non seulement les granulats peuvent limiter la résistance du béton mais selon leurs propriétés ils affecteront la durabilité et les performances structurales du béton. (En fait on ne peut pas confectionner un béton résistant avec des granulats dont les propriétés sont médiocres).

En fait les granulats ne sont pas réellement inertes et leurs propriétés physiques, thermiques et dans certain cas chimiques influencent les performances du béton.

Les sables et gravillons naturels alluvionnaires obtenus par criblage, parfois avec concassage sont satisfaisants (silex, calcaires durs et les silico- calcaires). Même les roches éruptives ou sédimentaires concassées (granite, quartzites, ...) conviennent également pour la réalisation du béton.

Le recours aux granulats artificiels légers (argile expansée, laitier bouleté) permet de formuler des bétons de densité réduite mais de coût élevé. (Chanvillard, 1999).

Les granulats provenant des sous produits industriels, et les granulats du béton recyclé présentant des matériaux dont la valorisation permet plusieurs avantages : Economique, technologique et écologique.

Les granulats coûtent beaucoup moins cher que le ciment, il devient alors économique d'en inclure la plus grande quantité possible dans le béton, contrairement au ciment.

Afin d'étudier l'influence des granulats du laitier sur les propriétés du béton basique, il faut préciser la nature des granulats du laitier à incorporer dans le béton :

Le laitier granulé comme granulats fin où bien le laitier cristallisé comme gros granulats.

A cet effet nous suivrons les étapes suivantes :

- Le choix des granulats du laitier à utiliser.
- La formulation des bétons à étudier.
- Etude des propriétés des bétons durcis : (résistance mécanique).

Laitier

Le laitier utilisé est un sous-produit de la fabrication de la fonte, de l'usine d'El-Hadjar (Annaba, Algérie). Suivant le processus du refroidissement du laitier fondu on obtient deux produits différents :

- Le laitier granulé obtenu par refroidissement rapide dans l'eau.
- Le laitier cristallisé obtenu par refroidissement lent à l'air.

Selon (Aïctin, 1966) le laitier cristallisé de hauts fourneaux constitue un excellent agrégat à béton que l'on aura intérêt à utiliser sous forme de graviers plutôt sous forme de sable fin.

Par contre le laitier vitreux de hauts fourneaux constitue d'excellents sables correcteurs pour mortiers et bétons dont l'emploi est tout particulièrement recommandé pour réaliser de bétons très exposés aux intempéries.

Donc, le laitier granulé sert comme un sable silico-calcaire pour la réalisation des bétons, et le laitier cristallisé concassé, constitue un excellent granulat pour béton.

Afin d'apprécier la qualité de ces produits comme granulats fins et grossiers pour la réalisation des bétons. Les trois possibilités de leurs utilisations sont étudiées :

- Substitution partielle et totale du sable naturel par du laitier granulé.
- Substitution partielle et totale de la pierre concassée naturel par le laitier cristallisé.
- Substitution partielle et totale du squelette granulaire (sable et pierre concassée) par les produits du laitier.

Nous abordons dans cette partie l'ouvrabilité du béton et sa résistance comme des critères caractérisant la qualité du béton.

L'ouvrabilité qui présente une caractéristique essentielle pour une fabrication réussie de l'ouvrage, elle dépend avant tout du dosage en eau. L'eau introduite dans l'empilement granulaire va dans un premier temps remplir la porosité résiduelle, puis écarter le squelette compact pour conférer aux grains une certaine mobilité.

La résistance mécanique qui présente un paramètre important dans la réalisation d'un béton, reflète la qualité du béton et sa durabilité.

Le laitier granulé

Le laitier granulé, se présente sous la forme d'un sable vitrifié, très poreux, de teinte jaune à brune, il ne contient aucune impureté, ne gonfle pas à l'humidité et il est insensible au gel.

Le laitier granulé après correction granulométrique par un broyage léger où une addition de fine peut être employée comme sable dans le béton.

Une étude comparative est menée sur plusieurs types de béton présentant de pourcentages croissants en laitier granulé (30 %, 50 %, 100 %) est un béton ordinaire afin d'estimer la qualité du laitier granulé comme sable (Zeghichi, 2004b) et (Zeghichi et al, 2005b).

Cette étude a traité l'effet de substitution au sable par du laitier sur le comportement du béton à l'état frais et durci.

Le laitier cristallisé

Le laitier cristallisé est une véritable roche silico-calcaire, analogue au basalte, après concassage et criblage, il constitue un granulat normalisé classé suivant les mêmes classes granulaires que les granulats traditionnels, il est d'ailleurs assimilé en tant que granulat lourd, en ce qui concerne les essais de réception. C'est un granulat d'aspect anguleux, rugueux à structure micro -alvéolaire et de couleur grise, il est inattaquable par l'eau et sa porosité est inférieure à 10 %, sa teneur en SO₃ doit être inférieure à 10 %.

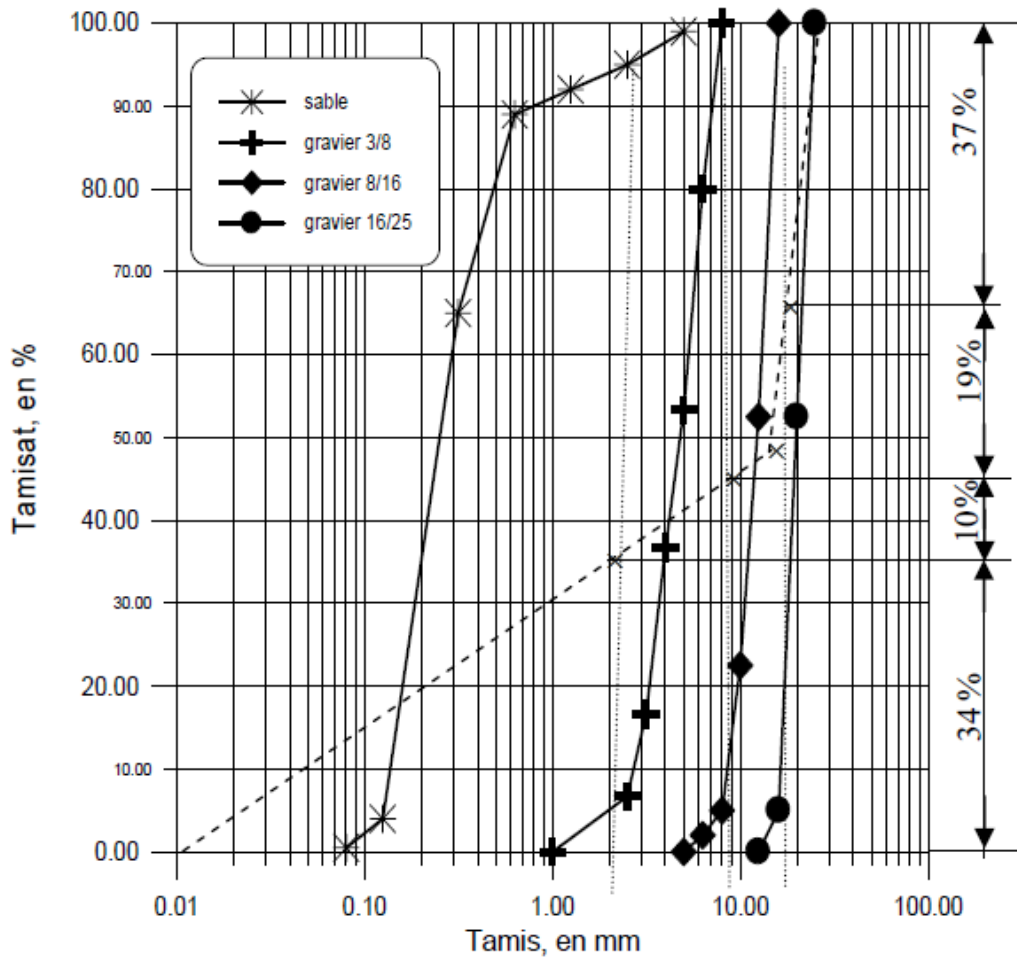


Figure II- 1:La composition du mélange de béton en granulats (sable, pierres concassées).

II.2.2. Ciment

a) Définition :

Les ciments usuels sont aussi appelés liants hydrauliques car ils ont la propriété de s'hydrater en présence d'eau et parce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Il ne faut pas confondre :

Le ciment, poudre commercialisée en sac ou en vrac, avant son gâchage avec l'eau; la pâte de ciment, au moment du gâchage du ciment avec l'eau; le ciment hydraté ou pâte de ciment durcie lorsque le mélange eau + ciment s'est solidifié.

b) Les constituants du ciment

1) fabrication du clinker

Le composé de base des ciments est un mélange de chaux apportée par des roches calcaires et d'alumine, de silice et d'oxyde de fer apportés par des argiles. Calcaires et argiles sont extraits de carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450°C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker Portland.

Le clinker, auquel on ajoute quelque pourcentage de gypse est ensuite finement broyé de manière à obtenir une poudre dont la masse volumique absolue varie de 3,0 à 3,2 kg/dm³.

2) Autres Constituants Des Ciments

Ils modifient les propriétés du ciment grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques. De part leur nature, ils permettent aussi d'abaisser le prix de revient.

a) laitier granulé de Haut fourneau (S) : Il est obtenu par refroidissement rapide de scories provenant de la fusion de minerai de fer dans un haut fourneau. Le laitier a des propriétés hydrauliques.

b) Pouzzolanes naturelles (Z) : Ce sont des roches d'origine volcanique ou sédimentaires ayant une composition appropriée, ou des argiles et schistes activés thermiquement. Les pouzzolanes n'ont pas de propriété hydrauliques, mais en présence de la chaux libérée par le clinker au cours des on hydratation, elles forment des hydrates stables : on dit qu'elles ont des propriétés pouzzolaniques.

c) Cendres volantes (V ou W) : Elles proviennent du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques au charbon. On distingue : Les cendres volantes siliceuses (V) qui ont des propriétés pouzzolaniques; Les cendres volantes calciques (W) qui ont des propriétés hydrauliques et parfois pouzzolaniques.

d) Schistes calcinés(T): Ce sont des schistes portés à une température de 800°C dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi pouzzolaniques.

e) Calcaires (L): Ils doivent être constitués de 75% au moins de CaCO₃

f) Fumées de silice (D) : Proviennent de l'industrie du silicium et des alliages. Elles ont des propriétés pouzzolaniques.

g) Fillers(F): Ce sont des constituants secondaires et n'excèdent pas 5% dans la composition des ciments. Ce sont des matières minérales naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau).

c) Classification des ciments:

1) Classification en fonction de leur composition : norme NFP15-301

	Ciment Portland	Ciment portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pouzzolanique		Ciment au laitier et aux cendres	
	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III/A	CHF-CEM III/B	CLK-CEM III/C	CPZ-CEM IV/A	CPZ-CEM IV/B	CLC-CEM V/A	CLC-CEM V/B
Clinker (K)	≥ 95%	≥ 80% ≤ 94%	≥ 65% ≤ 79%	≥ 35% ≤ 64%	≥ 20% ≤ 34%	≥ 5% ≤ 19%	≥ 65% ≤ 90%	≥ 45% ≤ 64%	≥ 40% ≤ 64%	≥ 20% ≤ 39%
Laitier (S)	*	6% ≤	21% ≤	≥ 36% ≤ 65%	≥ 66% ≤ 80%	≥ 81% ≤ 95%	*	*	≥ 18% ≤ 30%	≥ 31% ≤ 50%
Pouzzolane (Z)	*	total	total	*	*	*	10% ≤ total	36% ≤ total	18% ≤ total	31% ≤ total
Cendres siliceuses (V)	*	≤ 20%	≤ 35%	*	*	*	≤ 35%	≤ 55%	≤ 30%	≤ 50%
Fumée de silice (D)	*	(fumée	(fumée	*	*	*	(fumée ≤ 10%)	(fumée ≤ 10%)	*	*
Cendres calcaïques (W)	*	de	de	*	*	*	*	*	*	*
Schistes (T)	*	silice	silice	*	*	*	*	*	*	*
Calcaïres (L)	*	≤ 10%)	≤ 10%)	*	*	*	*	*	*	*
Fillers (F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Tableau II- 1: les différents ciments et les proportions en masse de leurs constituants. Les constituants marqués d'une étoile sont secondaires (moins de 5 %).

2) Classification en fonction de leur résistance:

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28jours; des sous-classes sont associées aux 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées.

Les classes doivent respecter les spécifications indiquées dans (Tableau 2.2) ci-dessous. Les valeurs entre parenthèses sont des valeurs garanties lorsqu'elles peuvent être inférieures aux valeurs spécifiées.

Classe	Résistance à la compression (MPa) norme EN 196-1				Retrait à 28 jours (1)	Début de prise	Stabilité
	au jeune âge		à 28 jours		norme	norme	norme
	2 jours	7 jours	mini	maxi	P 15-433 ($\mu\text{m/m}$)	EN 196-3 (min)	EN 196-3 (mm)
32,5		(17,5)	$\geq 32,5$ (30)	$\leq 52,5$	≤ 800	≥ 90	≤ 10
32,5 R	$\geq 13,5$ (12)		$\geq 32,5$ (30)	$\leq 52,5$	≤ 1000	≥ 90	≤ 10
42,5	$\geq 12,5$ (10)		$\geq 42,5$ (40)	$\leq 62,5$	≤ 1000	≥ 60	≤ 10
42,5 R	≥ 20 (18)		$\geq 42,5$ (40)	$\leq 62,5$	≤ 1000	≥ 60	≤ 10
52,5	≥ 20 (18)		$\geq 52,5$ (50)			≥ 60	≤ 10
52,5 R	≥ 30 (28)		$\geq 52,5$ (50)			≥ 60	≤ 10

Tableau II- 2 : Classes en fonction de la résistance normale à 28 jours

Nous avons utilisé un seul type de ciment pour confectionner les éprouvettes des bétons. Le ciment utilisé est un ciment portland ordinaire. Une analyse chimique du ciment est réalisée.

II.2.3. Eau de gâchage

L'eau est un constituant du béton nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier. Une classification classique permet de distinguer trois types d'eau:

- **L'eau chimiquement liée** : Elle n'est plus considérée comme faisant partie de la phase liquide car cette eau est combiné aux hydrates, dont elle fait partie, sous forme d'eau de cristallisation.
- **L'eau adsorbée**: est constituée par les couches de molécules d'eau sur la surface solide des pores. Soumises aux champs des forces électriques superficielles des particules de CSH et à l'action des forces de VAN DER WAALS. La structure électronique de la molécule d'eau ne varie que très peu dans ce cas la.
- **L'eau libre**: cette eau échappe aux forces superficielles des particules solides. En excès par rapport à l'eau nécessaire à l'hydratation, elle occupe les macropores.

L'eau dans la pâte de ciment :

L'eau présente dans les C-S-H et celle présente dans les zones d'adsorption empêchée jouent un rôle majeur dans le comportement différé du béton. Leurs caractéristiques sont les suivantes:

L'eau dans les C-S-H: A partir de multiples méthodes expérimentales, Sierra, cité par Baron et Sauterey [Baron et Sauterey, 1982], a pu identifier dans la structure des C-S-H la présence de l'eau sous trois formes, classées ici par ordre décroissant d'énergie de liaison avec le solide (Figure 2.2) :

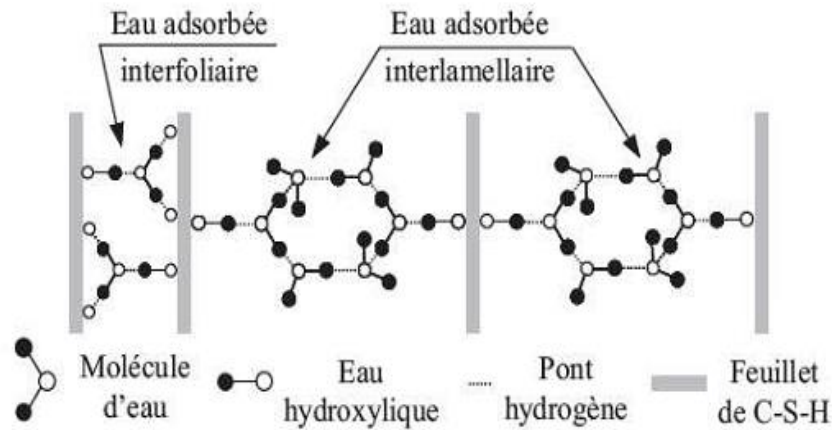


Figure II- 2 : Etat de l'eau dans les C-S-H

L'eau hydroxyle (groupement O-H) : elle est liée aux atomes de silicium et de calcium à la surface des feuillets.

L'eau inter foliaire (ou inter feuillet) : elle est liée aux feuillets par des groupements hydroxyles. Elle intervient dans la cohésion intrinsèque de la lamelle.

L'eau inter lamellaire: elle est soit fixée à la surface des lamelles par un hydroxyle, soit liée à d'autres molécules d'eau.

Pour la confection des différents bétons, l'eau potable a été utilisée, distribuée par le réseau du service public. L'analyse chimique de cette eau a été réalisée au laboratoire de l'Algérienne des eaux. Ils répondent aux prescriptions de la norme NF P 18-303.

II.2.4. Rôle des différents éléments constituant le béton:

- **Ciment :** c'est le constituant qui va réagir chimiquement avec l'eau, devenir résistant, et lier tous les ingrédients.
- **L'eau:** c'est elle qui va hydrater le ciment et rendre le mélange malléable.
- **Les granulats :** ils vont former une disposition plus ou moins ordonnée qui va conférer au béton sa résistance. C'est le ciment hydraté qui va "coller" les granulats.
- **Le sable:** il permet de remplir les trous qui subsistent entre les gros granulats.

II. 3. Propriétés des bétons:

Le béton doit être considéré sous deux aspects :

- **le béton frais:** mélange de matériaux solides en suspension dans l'eau, se trouve en état foisonné à la sortie des appareils de malaxage et en état compacté après sa mise en œuvre dans son coffrage.

• **le béton durci**: solide dont les propriétés de résistance mécanique et de durabilité s'acquièrent au cours du déroulement de réactions physico-chimiques entre ses constituants, d'une durée de quelques jours à quelques semaines.

II.3.1. Le béton frais:

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité, qui le rend apte à remplir n'importe quel volume, à condition que sa composition ait été étudiée en conséquence et que les moyens de mise en œuvre soient appropriés. L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton à remplir les coffrages et à enrober convenablement les armatures. De nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité: type et dosage en ciment, forme des granulats, granulométrie, emploi d'adjuvants et, bien entendu, dosage en eau.

a) la valeur d'affaissement au cône d'Abrams

La norme NF EN 206-1 définit cinq classes de consistance.

Classe	Consistance du béton	Affaissement (en mm) au cône d'Abrams
S1	Ferme	10 - 40
S2	Plastique	50 - 90
S3	Très plastique	100 - 150
S4	Fluide	160 - 210
S5	Très fluide	≥220

Tableau II.3-Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams

b) La masse volumique du béton frais

On mesure la masse volumique du béton frais à l'aide d'un récipient étanche à l'eau et suffisamment rigide. Le béton est mis en place dans le récipient et vibré à l'aide d'une aiguille vibrante, une table vibrante ou un serrage manuel en utilisant une barre ou tige de piquage, après un arasement approprié. Le récipient et son contenu doivent être pesés afin de déterminer la masse volumique qui sera calculée en utilisant la formule suivante :

$$D = (M2 - M1)/V$$

D : est la masse volumique du béton

M1 : est la masse du récipient (kg).

M2 : est la masse du récipient plus la masse du béton contenu dans le récipient (kg).

V : est le volume du récipient en mètre cube (m³)

II.3.2. Le béton durci:

Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois, voire des années.

- La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité.
- Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci.
- Les phénomènes de retrait sont une caractéristique prévisible dans l'évolution du béton.
- Les caractéristiques de déformations sous charge du béton sont connues et peuvent être mesurées.

a) Résistance à la compression

Parmi toutes les sollicitations mécaniques, la résistance du béton en compression uni-axiale a été la plus étudiée, vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée. De plus, la résistance du béton en compression est presque invariablement l'élément clé lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité.

Un béton est défini par la valeur de sa résistance caractéristique à la compression à 28 jours, f_{c28} . La résistance à la compression du béton est mesurée par la charge conduisant à l'écrasement par compression axiale d'une éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur. Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression, La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée La résistance à la compression est donnée par l'équation suivante :

$$f_c = \frac{F}{AC}$$

f_c : résistance en compression, exprimée en mégapascal (Newton par millimètres carrés)

F : charge maximale, exprimée en Newtons

AC; l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée, calculée à partir de la dimension nominale de l'éprouvette.

La résistance à la compression doit être exprimée à MPa (N/mm^2) près.

b) Résistance à la traction par flexion

Des éprouvettes prismatiques de dimensions 7 x 7 x 28 cm sont soumises à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. La charge maximale enregistrée au cours de l'essai est notée et la résistance à la flexion est calculée.

Les mesures sont faites sur une presse qui répond aux normes NFP18-407(NA428), munie d'un banc de flexion à 4 points. Pour une charge totale P, le moment de flexion constant entre les deux points d'application de la charge est :

$$M = \frac{P * A}{2}$$

Et la contrainte de traction correspondante sur la fibre inférieure est $f_{tj} = 6M / a^3$

La relation suivante permet de calculer la résistance :

$$F_{tffj} = 1.8 \frac{P}{a^2}$$

II. 4. La formulation de béton:

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents composants du béton (granulat, eau, ciment) afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées (résistance, consistance).

On a recours, dans ce cas aux méthodes de détermination des proportions des différents composants ou on trouve soit :

- Les méthodes semi-empiriques (Faury, Bolomey, Vallette).
- Les méthodes graphiques (Joisel, Dreux-gorisse).

II.4.1. Méthodes de Dreux Gorisse

Le choix de la méthode de formulation s'est fait en fonction des critères suivants :

- Une méthode assez simple et facile à utiliser.
- C'est une méthode appliquée au niveau des laboratoires de l'est algérien comme ceux du C.T.C. Est, le L.T.P. Est et autres laboratoires privés
- pour pouvoir comparer les résultats à ceux des autres organismes de contrôle.

a) Détermination du dosage en ciment:

On évalue d'abord le rapport E/C en fonction de la résistance désirée sur la base de la formule :

$$R_b = GR_c \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

OU :

R_b : Résistance à la compression du béton prévue à 28 jours, en bars

G: Coefficient granulaire donné par le (Tableau II.4), en fonction de la qualité et de la dimension maximale (*D_{max}*) du gravier

R_c : Classe vraie du ciment à 28 jours, en bars

Connaissant le rapport C \ E la fluidité désirée, qui est une donnée du problème, on peut déterminer le dosage en ciment d'après l'abaque (Figure II.3)

valeurs de G coefficient granulaire			
qualité des granulats	dimension des granulats D (mm)		
	Fins D 16	moyens 25 D 40	gros D 63
Excellente	0.55	0.60	0.65
bonne, courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

Tableau II.4 Valeurs de G coefficient granulaire

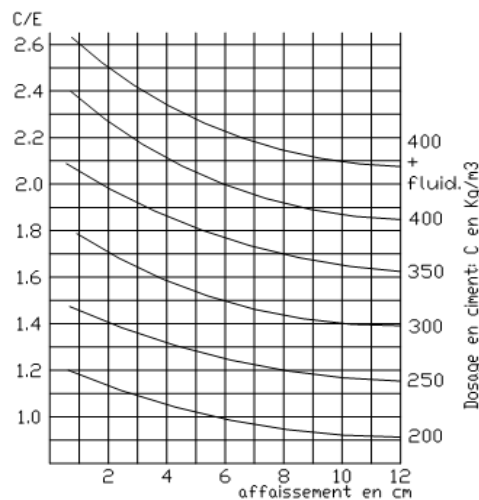


Figure II- 3 : Dosage en ciment

b) Détermination du dosage en eau:

Connaissant C/E et le dosage en ciment (C) on déduit le dosage en eau total à prévoir par la formule :

$$E = \frac{C}{\frac{C}{E}}$$

c) Détermination du dosage en granulat:

C'est le pourcentage de sable et de gravier exprimé à partir de la courbe granulaire de référence construite par l'une des méthodes de composition de béton, (Figure II.6) ci-dessous courbe OAB. La courbe OAB, où B à l'ordonnée 100% correspond à la dimension D du plus gros granulat et le point de brisure A à des coordonnées ainsi définies comme suit :

• **En abscisse:**

Si $D \leq 20\text{mm}$ l'abscisse est $D/2$,

Si $D \geq 20\text{mm}$ l'abscisse est située au milieu du segment, gravier limité par le module 38(5mm) et le module correspond à (Dmax.)

• **En ordonnée:** Y donnée par la formule suivante :

$$Y = 50 - \sqrt{D} - K$$

K : est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés (sur tout le sable, dont l'influence est prépondérante) et également du module de finesse du sable qui est donné par le (Tableau II.5)

vibration	faible		normale		puissante	
	roulé	concassé	roulé	concassé	roulé	concassé
400+fluidifiants	-2	0	-4	-2	-6	-4
400	0	+2	-2	0	-4	-2
350	+2	+4	0	+2	-2	0
300	+4	+6	+2	+4	0	+2
250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

Tableau II.5 valeur du terme correcteur K

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants. On trace alors les lignes de partage entre chacun des granulats en joignant le point à 95% de la courbe du granulats suivant, et ainsi de suite. On lira alors sur la courbe de référence au point de croisement avec la ou les droites de partage le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats g_1, g_2, g_3 par exemple.

Si c 'est le dosage en ciment, le volume absolu des grains de ciment est :

$$c = \frac{C}{\rho_c}$$

ρ_c : C'est la masse spécifique pour les grains du ciment Le volume absolu de l'ensemble des granulats est :

$$V = 1000\gamma - c$$

Ou : γ : coefficient de compacité qui est donné par le (Tableau II.6)

consistance du béton frais	mode de serrage	G						
		Dmax 5 mm	Dmax 10 mm	Dmax 12.5 mm	Dmax 20 mm	Dmax 31.5 mm	Dmax 50 mm	Dmax 80 mm
molle	Piquage	0.750	0.780	0.795	0.805	0.810	0.815	0.820
	vibration faible	0.755	0.785	0.800	0.810	0.815	0.820	0.825
	vibration normal	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
plastique	Piquage	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.830	0.830
	vibration faible	0.765	0.795	0.810	0.820	0.825	0.835	0.835
	vibration normal	0.770	0.800	0.815	0.825	0.830	0.835	0.835
	vibration puissante	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
ferme	vibration faible	0.775	0.805	0.820	0.830	0.840	0.840	0.845
	vibration normal	0.780	0.810	0.825	0.835	0.845	0.845	0.850
	vibration puissante	0.785	0.815	0.830	0.840	0.850	0.850	0.855

Tableau II.6 coefficient de compacité

ANALYSE GRANULOMETRIQUE

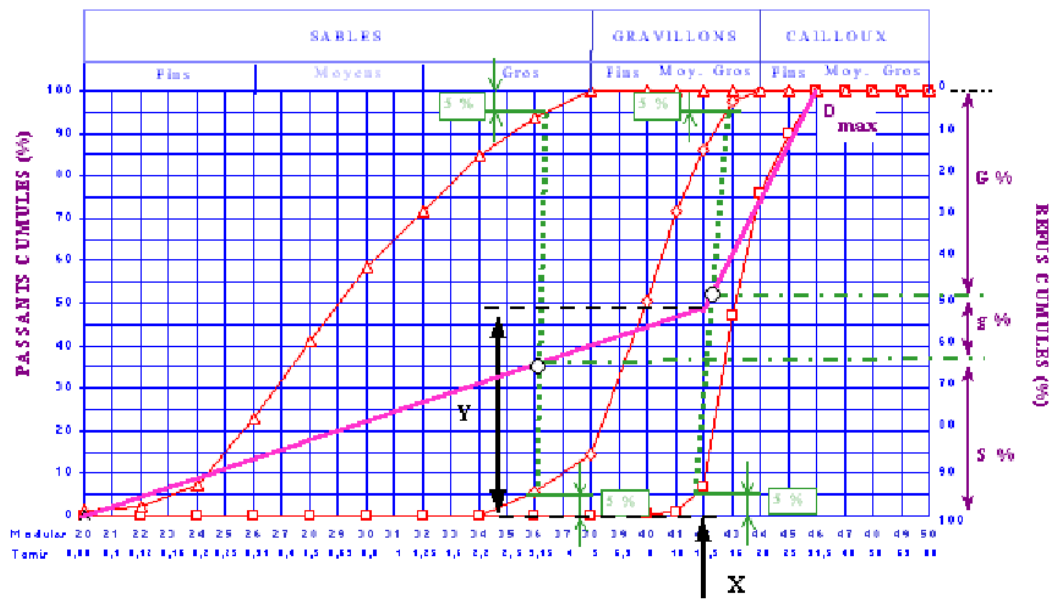


Figure II- 4 : la courbe granulaire de référence

II. 5. Conclusion

L'objectif de la conception de l'ensemble des proportions de tout le béton est de produire la combinaison la plus économique des matériaux disponibles qui seront conformes aux propriétés requises du béton à la fois, a l'état frais et durci. Le béton est normalement conçu pour donner une résistance à 28 jours, et le mélange devrait avoir la plasticité suffisante pour lui permettre d'être facilement placée et compacté. Les aspects de durabilité du béton doivent également faire l'objet de précision des mélanges par une contenance minimale de ciment et/ou un rapport Eau/Ciment maximal. Actuellement il n'y a pas de méthode de conception du mélange du béton au laitier. Wainwright, a suggéré que la méthode utilisée pour le béton ordinaire est probablement adoptée pour le béton au laitier.

Chapitre III :

Expérimentation

III : EXPERIMENTATION

III. 1. Introduction

Dans un souci de sauvegarder l'environnement et de palier au déficit économique, nous avons envisagé d'étudier les possibilités d'élaborer un béton à base des granulats de laitier cristallisé ayant des caractéristiques satisfaisantes, en particulier, la résistance mécanique.

L'investigation sur l'utilisation du laitier granulé d'El-Hadjar, dans le béton, a nécessité un programme expérimental bien défini.

Les résultats expérimentaux menés à travers cette étude permettent de dégager les conclusions générales et les perspectives pour des futurs travaux de recherche.

Les bétons légers sont des bétons qui répondent aux exigences des constructions et ouvrages modernes.

Ils permettent aux concepteurs de construire des structures élancées et durables. Cette étude consiste à trouver une application possible et utile au laitier de haut fourneau dans l'élaboration des bétons. De ce fait, l'objet de la présente étude consiste à formuler des bétons à base de laitier cristallisé.

III. 2. FORMULATION DES BETONS

Formuler un béton consiste à déterminer un mélange optimal des granulats dont on dispose ainsi que le dosage en fines (ciment et additions) et en eau afin d'obtenir les qualités recherchées.

Le Ciment :

Le type de ciment utilisé dans notre travail de recherche, suivant la norme NF EN 197-1 est un ciment portland composé CPJ CEM II/A 42,5 N de la cimenterie de M'sila. Les caractéristiques physiques, mécaniques, et chimiques sont étudiées.

L'étude suivante consiste en premier lieu à confectionner un béton ordinaire dont les ingrédients sont connus : granulats, ciment et eau. Pour le formuler, la méthode choisie est facile à appliquer, elle a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantiers et ayant données satisfaction, c'est la méthode de Dreux Gorisse modifiée.

En second lieu, on propose d'appliquer cette méthode pour formuler le béton basique afin d'éviter d'autres méthodes mentionnées en (Mezghiche, 1989) qui sont un peu compliquées par rapports à celle de Dreux Gorisse.

Méthode de Dreux Gorisse

C'est une méthode simple d'utilisation, puisqu'elle ne demande que de connaître les courbes granulométriques des granulats utilisés.

Les données sont :

- Dimension maximale des granulats $D = 25$ mm.

- Courbe de référence : $x=12,5$, $y=48$.
- Composition du mélange en granulats
- Pierres concassées $16/25 = 37 \%$, $8/16 = 19 \%$ et $3/8 = 10 \%$
- Sable $0/3 = 34 \%$.

Deux mélanges de béton sont préparés :

1er mélange : béton ordinaire à base de granulats naturels.

2eme mélange : béton ordinaire à base de granulats de laitier cristallisé.

Les abréviations suivantes :

(B.O.G.N) : béton ordinaire à base de granulats naturels.

(B.O.G.L) : béton ordinaire à base de granulats de laitier.

Bétons	B.O.G.N	B.O.G.L
Constituants		
Ciment CPJ	355	355
Laitier	-	-
Granulats grossiers		
16/25	657	632
8/16	332	325
3/8	174	175
Sable	590	590
Eau	188L	188L
Solution basique	-	-
Masse volumique théorique (Kg/m³)	2296	2265
Rapport E/C	0,53	0,53

Tableau III- 1: Les constituants des différents bétons en masse (Kg/m3).

Les quantités obtenues en volume (%) sont représentés au tableau III.2 :

Bétons	B.O.G.N	B.O.G.L
Constituants		
Ciment CPJ	0,114	0,114
Laitier	-	-
Granulats grossiers		
16/25	0,252	0,252
8/16	0,130	0,130
3/8	0,068	0,068
Sable	0,232	0,322
Solution basique	-	-
Eau	0,188	0,188
air	0,015	0,015
Volume total %	1,00	1,00

Tableau III- 2: Les constituants des différents bétons en volume (%)

Les granulats grossiers représentent les granulats naturels et ceux du laitier cristallisé correspondant à chaque composition du béton.

III. 3. Programme des essais effectués

Afin de bien situer notre travail, donnons des précisions sur les points suivants :

- Conditions de préparation et de conservation des bétons que nous avons réalisés.
- Mesures que nous avons effectuées sur ces derniers.

Confection des éprouvettes et conservation :

Les éprouvettes ont été confectionnées conformément aux normes en vigueur (malaxage, mise en œuvre, serrage). Se sont de différentes géométries, selon le test à effectuer.

Elles sont conservées après démoulage à 24 h dans deux milieux :

- Sec ou laboratoire.
- Humide : dans l'eau à 20°C.

Ces éprouvettes sont de différentes géométries : cubiques de 10x10x10cm, prismatiques de 10x10x40cm et cylindriques de 16x32 cm.

III.3.1. Mesures effectuées sur les éprouvettes

Nature des essais

Pour caractériser l'effet de la substitution de l'agrégat de référence (naturel) par le laitier cristallisé nous avons choisi d'effectuer des essais sur le béton durci, en mesurant les résistances mécaniques des différents bétons par des essais de rupture par : compression, traction par flexion et traction par fendage.

Nombre de mesures

La moyenne arithmétique de trois essais est suffisante pour donner une valeur reproductible dans des limites acceptables.

Age des éprouvettes :

- Nous avons réalisé les essais de rupture en compression sur des éprouvettes cubiques après 7 jours, 14 jours et 28 jours de conservation au laboratoire (à l'aire) et dans l'eau.
- L'essai de traction par fendage sur des éprouvettes cylindriques après 7 jours, 14 jours et 28 jours de durcissement dans l'eau.

III. 4. PRESENTATION DES RESULTATS

L'association ciment-eau génère par réactions chimiques des hydrates stables, dont la multiplication et l'enchevêtrement des microcristaux augmentent les résistances mécaniques :

Le béton se transforme alors en une véritable roche composite.

Le processus de durcissement, et les différentes phases de la vie du béton sont présentés à la figure 3.1.

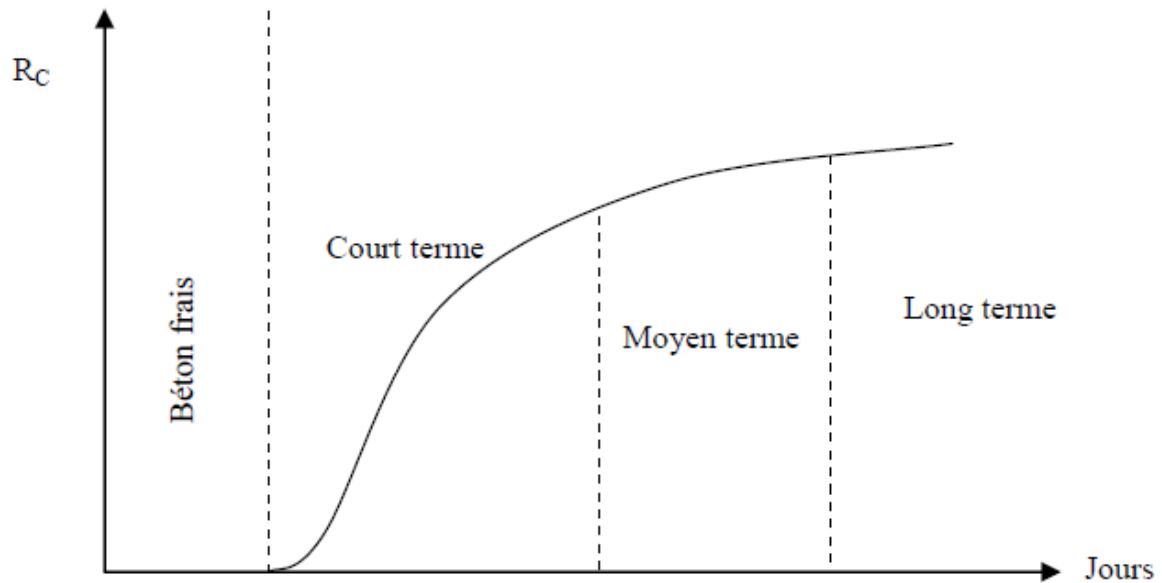


Figure III- 1: processus du durcissement du béton.

III.4.1. La résistance mécanique à la compression

La résistance mécanique à la compression du béton est généralement considérée comme sa plus importante propriété, elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée, elle est estimée soit à court terme où à long terme.

Dans ce paragraphe, on examine le développement de la résistance (taux d'augmentation) des deux bétons étudiés, en fonction du type du type des granulats utilisés et milieux de conservation.

a) Milieux sec

	B.O.G.N	B.O.G.L
Rc(7jours) MPa	22.10	24.90
Rc(14jours) Mpa	36.70	39.80
Rc(28jours) Mpa	38.30	42.20

Tableau III- 3: Résistance mécanique à la compression (milieu sec)**b) Milieu humide**

	B.O.G.N	B.O.G.L
Rc(7jours) MPa	23.50	27.20
Rc(14jours) Mpa	38.80	42.90
Rc(28jours) Mpa	41.40	45.10

Tableau III- 4: Résistance mécanique à la compression (milieu humide)**III.4.2. La résistance mécanique à la traction par fendage**

Cet essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse, l'éprouvette se rompt suivant un plan diamétral sous l'influence des contraintes de traction qui se développent normalement à la direction de compression.

La résistance à la traction par fendage est calculée après 7, 14 et 28 jours de durcissement

	B.O.G.N	B.O.G.L
Rt(7 jour) Mpa	2.80	2.90
Rt(14 jour) Mpa	2.90	3.10
Rt(28 jour) Mpa	3.30	3.60

Tableau III- 5: résistance mécanique à la traction par fendage**III.4.3. La résistance mécanique à la traction par flexion**

Cet essai consiste à rompre une éprouvette prismatique de côté a et de longueur $4a$ par application d'un moment de flexion vont $F.L/4$ (flexion à 3 points).

Lorsque l'on augmente progressivement la charge, on constate que la rupture se produit dans la zone du moment max, suivant un plan normal à l'axe longitudinal de ce prisme.

	B.O.G.N	B.O.G.L
Rt(7 jour) Mpa	5.50	5.60
Rt(14 jour) Mpa	5.80	5.70
Rt(28 jour) Mpa	6.10	6.20

Tableau III- 6: Résistance mécanique à la traction par flexion

III. 5. CONCLUSION

Nous avons étudié l'influence des granulats de laitier sur les propriétés du béton à l'état durci (résistance mécanique).

En fait, il s'agit d'une étude comparative entre une variété de bétons qu'on a formulé :

- Un béton ordinaire à base des granulats naturels servant comme un béton de référence (témoin).
- Un béton ordinaire à base des granulats de laitier cristallisé faisant l'objet de cette étude.
- Nous avons étudié l'influence du remplacement des granulats naturels grossiers par du laitier cristallisé sur les résistances mécaniques.

Certes le coté économique et écologique seront bénéficiaires de notre étude, mais nous montrons les avantages portés sur le coté technique seulement :

- Les résistances à la compression étaient d'autant plus élevées que l'âge des éprouvettes augmente ce qui peut s'expliquer par l'excellente adhérence entre la pâte et les granulats du laitier.
- Les résistances à la traction étaient légèrement élevées pour le béton de granulats de laitier

Chapitre IV:

Résultats et discussion

IV RESULTATS ET DISCUSSION

IV. 1. Introduction

Depuis que l'on fabrique des bétons, les ingénieurs et les chercheurs se sont efforcés d'élaborer des théories, d'effectuer des recherches et des essais et déduire des méthodes de composition pour la fabrication des bétons. Ces méthodes de formulation, de protection, de contrôle, et d'évaluation sont aujourd'hui très nombreuses. Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus du programme d'essais et présente une discussion de ces résultats.

IV. 2. Représentation et analyses des résultats

IV.2.1. La résistance mécanique à la compression

a-Milieu sec :

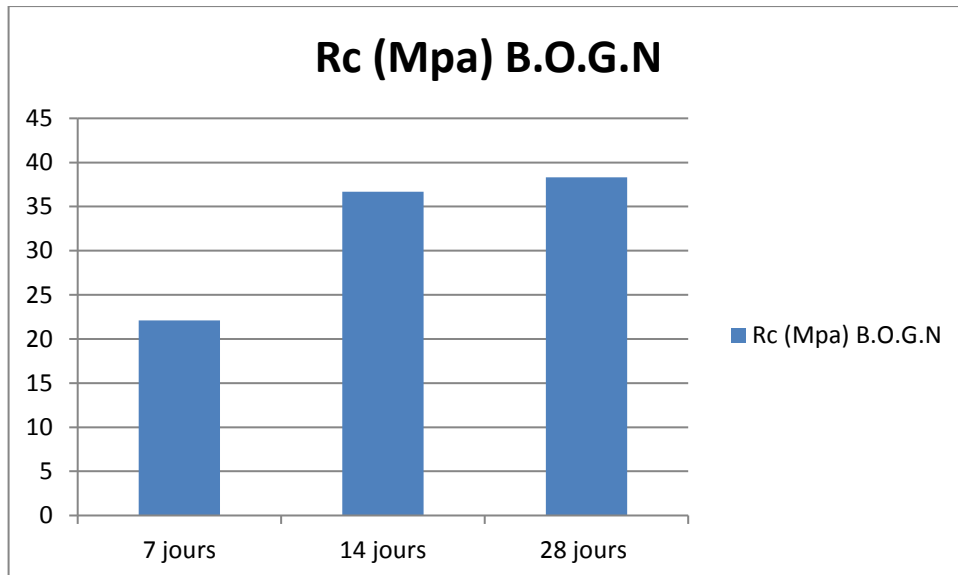


Figure IV- 1 : Histogramme de la résistance du (B.O.G.N) à la compression en fonction du temps (milieu sec)

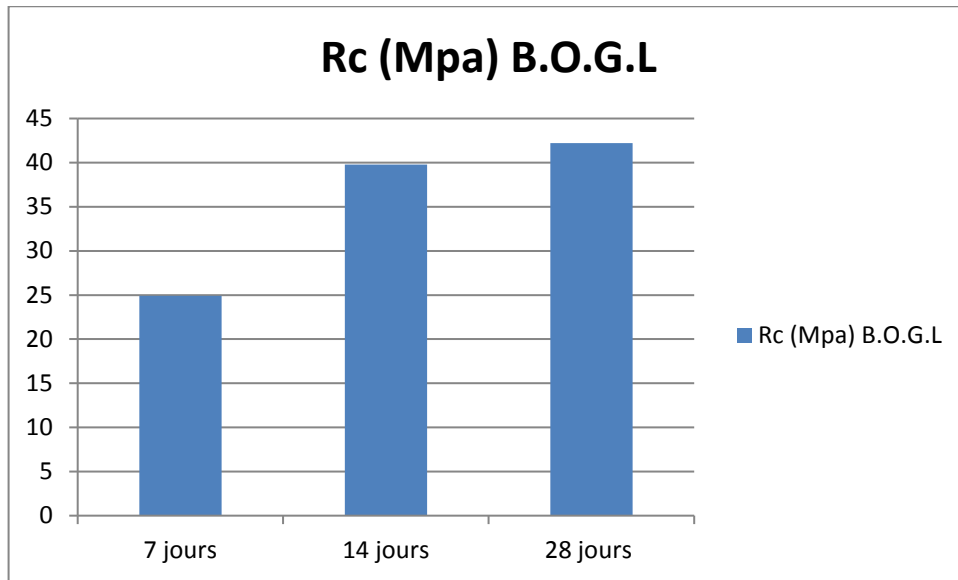


Figure IV- 2 : Histogramme de la résistance du (B.O.G.L) à la compression en fonction du temps (milieu sec)

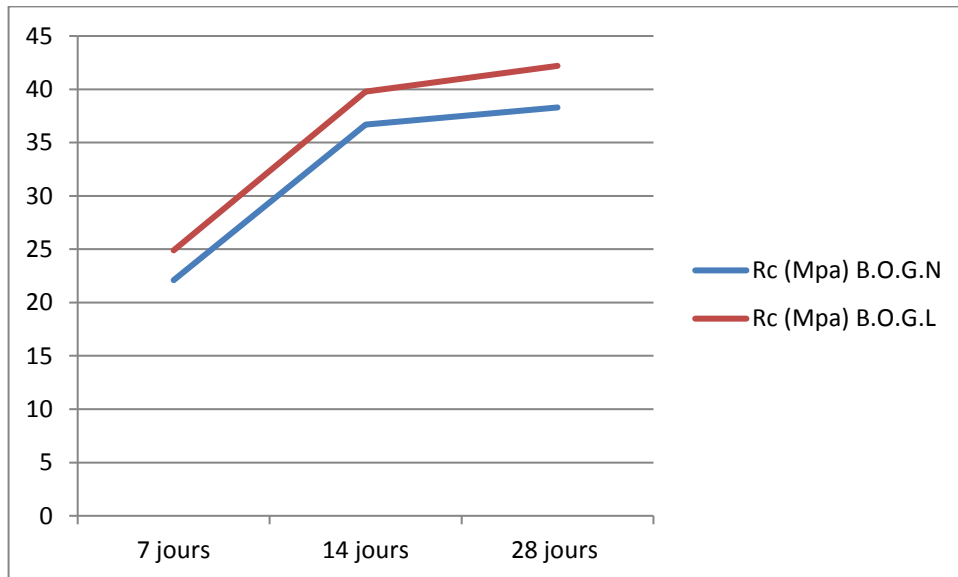


Figure IV- 3 : Courbes de les résistances des (B.O.G.N et B.O.G.L) à la compression en fonction du temps (milieu sec)

b-Milieu humide :

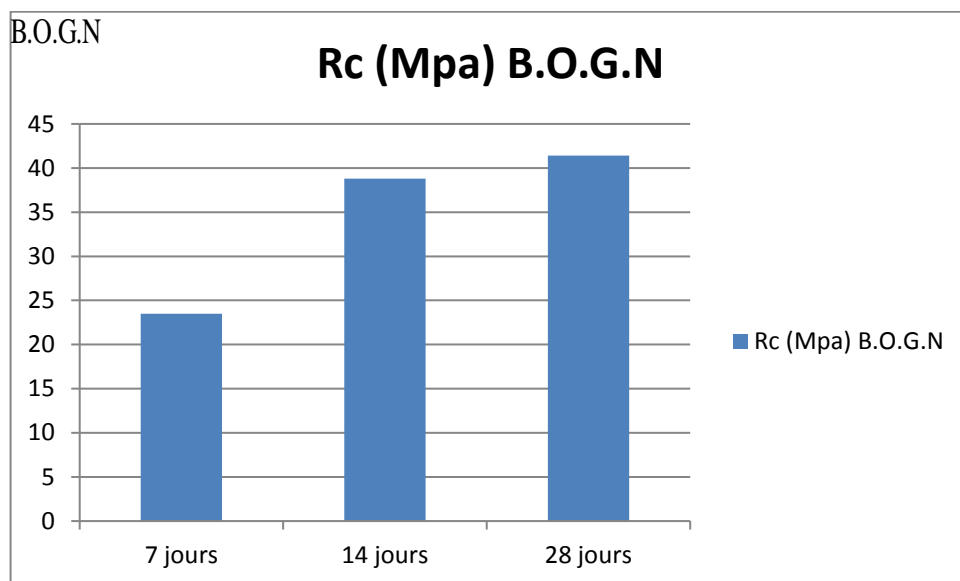


Figure IV- 4 : Histogramme de la résistance du (B.O.G.N) à la compression en fonction du temps (milieu humide)

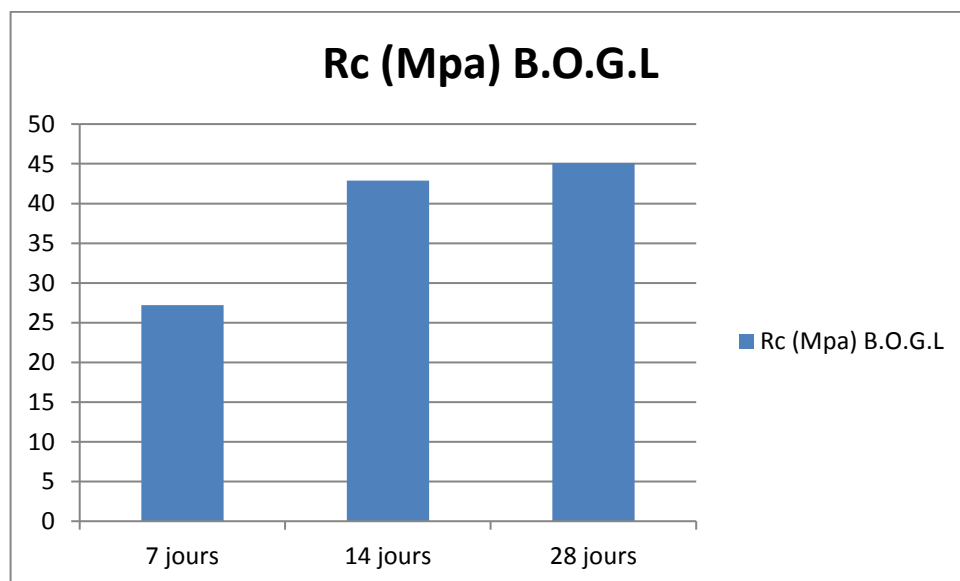


Figure IV- 5 : Histogramme de la résistance du (B.O.G.L) à la compression en fonction du temps (milieu humide)

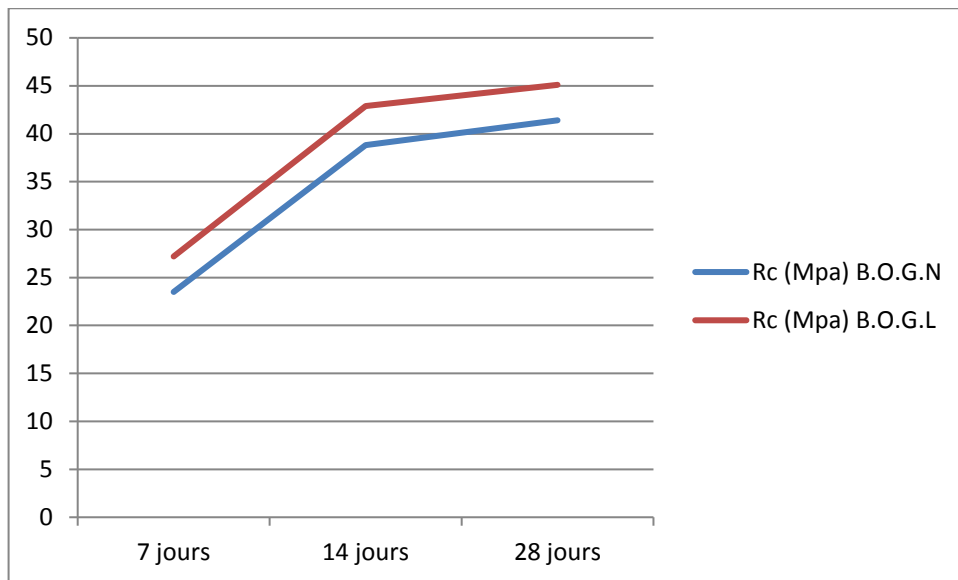


Figure IV- 6 : Courbes de les résistances des (B.O.G.N et B.O.G.L) à la compression en fonction du temps (milieu humide)

L'utilisation des granulats de laitier améliore la résistance à la compression du béton ordinaire aux différents âges de durcissement (7 j, 14 j et 28 j),

Le béton de granulats de laitier développe des résistances supérieures à celles des bétons de granulats naturelles dans les deux différents milieux de conservations.

IV.2.2. La résistance mécanique à la traction par fendage

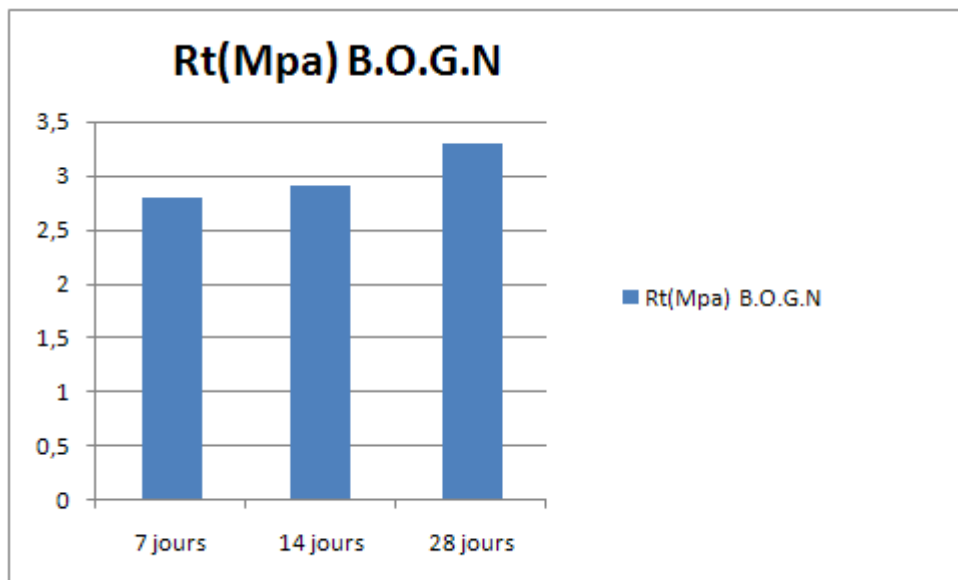


Figure IV- 7: Histogramme de la résistance du (B.O.G.N) à la traction par fendage en fonction du temps

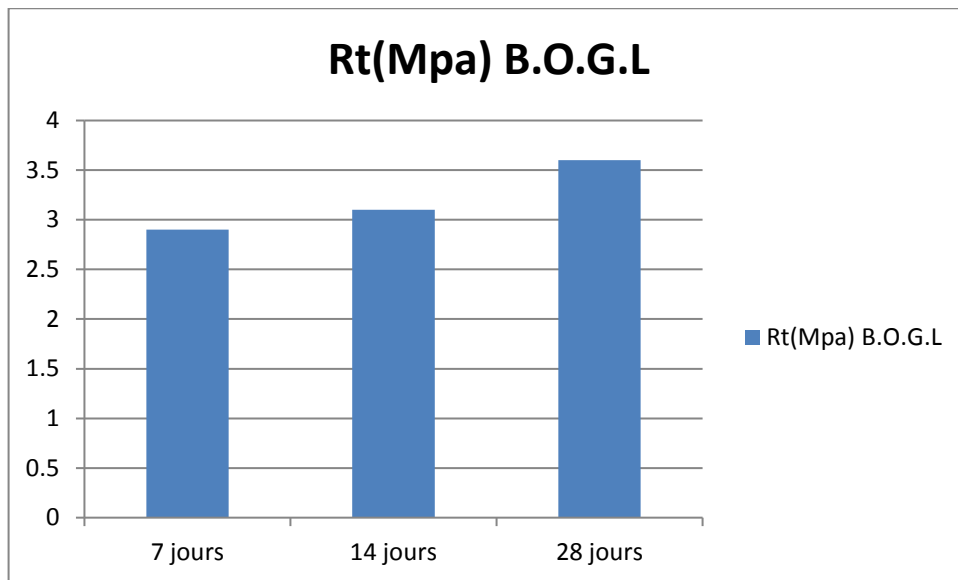


Figure IV- 8 : Histogramme de la résistance du (B.O.G.L) à la traction par fendage en fonction du temps

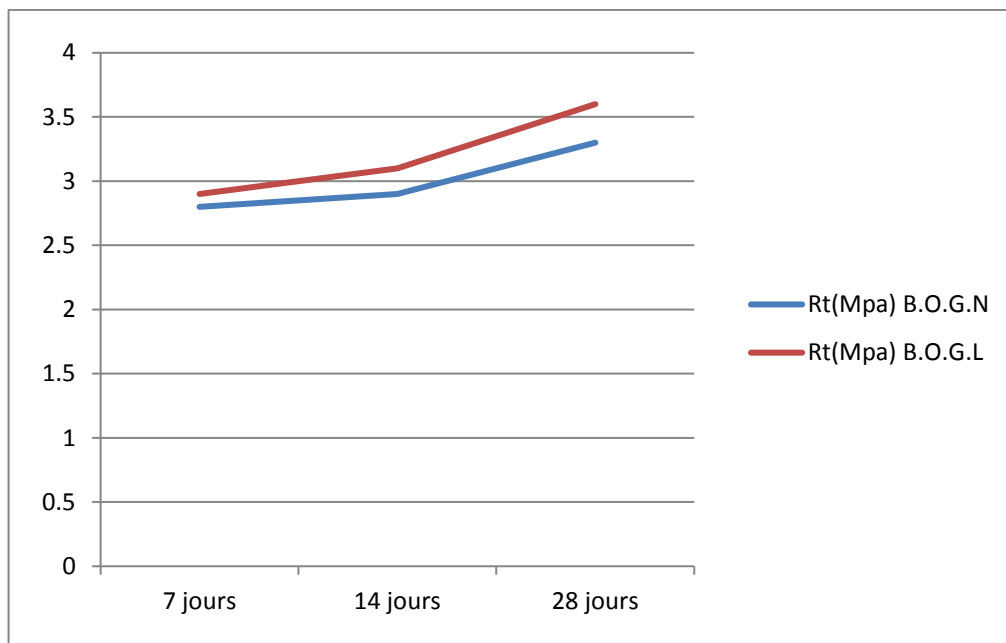


Figure IV- 9 : Courbes de les résistances des (B.O.G.N et B.O.G.L) à la traction par fendage en fonction du temps

Le type de granulats utilisé dans le béton influence sa résistance à la traction.

Le laitier cristallisé favorise l'adhérence pâte hydratée-granat, sa rugosité, son état de surface, présentent des facteurs contribuant à l'amélioration de la résistance.

IV.2.3. La résistance mécanique à la traction par flexion

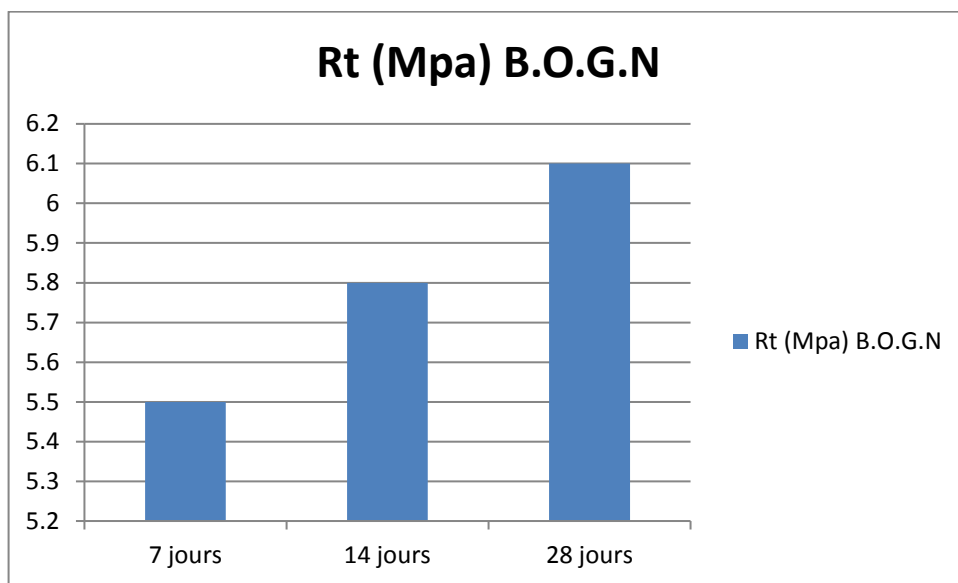


Figure IV- 10: Histogramme de la résistance du (B.O.G.N) à la traction par flexion en fonction du temps

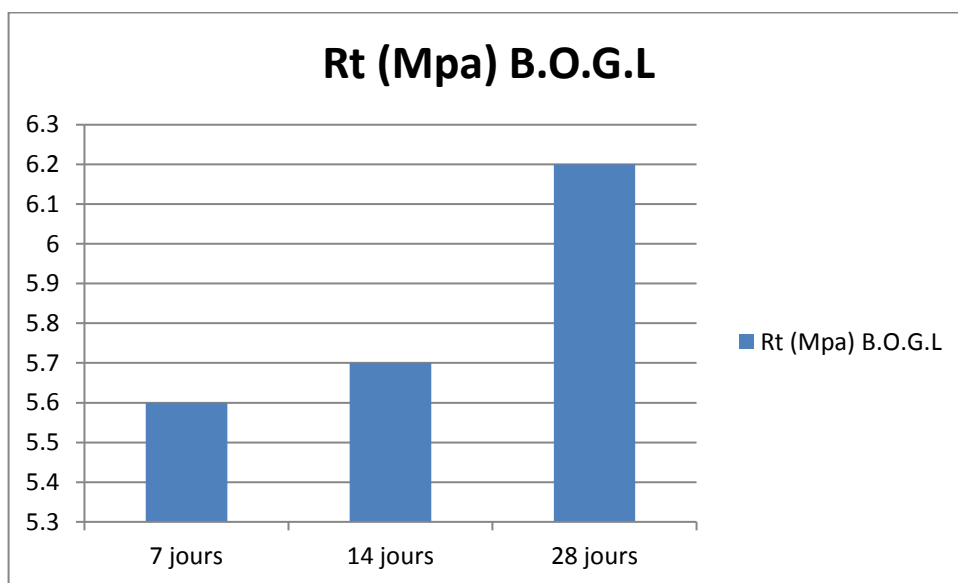


Figure IV- 11 : Histogramme de la résistance du (B.O.G.L) à la traction par fendage en fonction du temps

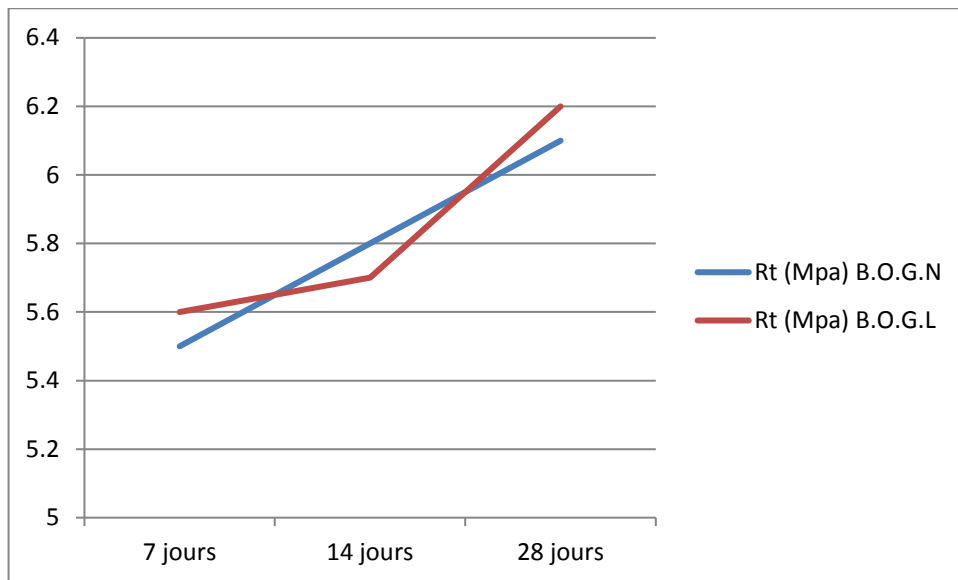


Figure IV- 12 : Courbes de les résistances des (B.O.G.N et B.O.G.L) à la traction par flexion en fonction du temps

Les résistances obtenues en traction par flexion sont très proches pour les deux types de béton avec une amélioration très légère pour le B.O.G.L

IV. 3. Conclusion

A partir des résultats obtenus, l'utilisation du laitier cristallisé en tant que granulats grossiers améliore la résistance mécanique à la compression et à la traction. Donc on a un intérêt à utiliser le laitier cristallisé comme granulats grossiers pour la confection des bétons, et d'étudier leurs influences sur les propriétés mécaniques du béton.

Conclusion générale

Conclusion générale

Un matériau tel que le laitier granulé présente de bonnes caractéristiques sur le plan économique, écologique, technique et mécano-chimique sur le plan économique, le laitier est un produit connexe à la fabrication de la fonte donc l'élaboration des ciments au laitier est intéressante car elle permet l'utilisation d'un sous-produit à faible coût énergétique comparé au clinker qui nécessite plus de 106 Kg de fuel par tonne. Sur le plan technique, l'addition du laitier au ciment ne change pas les produits d'hydratation mais modifie seulement la cinématique de leur formation et diminue la chaleur d'hydratation. Sur le plan mécanique, les ciments au laitier peuvent atteindre une résistance mécanique à 28 jours équivalente à celle du ciment portland. Enfin, sur le plan mécano-chimique les ciments à haut teneur en laitier ont un bon comportement en milieux agressifs.

Il est donc important d'étudier convenablement la possibilité d'utiliser ce laitier dans le Génie Civil, et d'effectuer plusieurs recherches pour surmonter ses défauts comme par exemple la faible résistance initiale.

Cette étude s'inscrit dans le cadre de l'utilisation du laitier du haut fourneau d'El-Hadjar (Annaba) comme granulats. Sur le plan économique, le coût du laitier est négligeable. Sur le plan technologique, des bonnes résistances mécaniques ont été constatées : en compression et en traction ce qui permet d'assurer une bonne résistance aux structures réalisées par remplacement des granulats ordinaires par celles du laitier.

Quant au but de notre projet, il consiste en la vérification des caractéristiques mécaniques de béton à base de granulats de laitier d'El-Hadjar. Ce laitier se présente en grande quantité dans la région d'Annaba, dont la valorisation est pratiquement inexistante.

Afin de répondre à ces préoccupations, un programme expérimental a été mis en place pour comprendre et apporter des éléments de réponse aux questions posées qui ont constitué les objectifs du présent travail. Plusieurs enseignements ont été tirés Sur les propriétés mécaniques.

Les essais pratiqués sur les bétons à base des granulats artificiels (ceux du laitier cristallisé) donnent des résultats très satisfaisants de l'amélioration de la résistance mécanique (compression et traction) par rapport au béton à base des granulats naturels.

- Les résistances à la compression étaient d'autant plus élevées que l'âge des éprouvettes augmente ce qui peut s'expliquer par l'excellente adhérence entre la pâte et les granulats du laitier.

•Les résistances à la traction étaient d'autant plus élevées que celles du béton contenant les granulats naturels. Nous avons montré que cet accroissement de la valeur de la résistance à la traction pouvait s'expliquer surtout par l'excellent accrochage mécanique entre les grains de laitier et la pâte de ciment hydratée.

Le laitier cristallisé d'El-Hadjar présente donc des caractéristiques nécessaires pour être un excellent granulat à béton.

Il est recommandé d'utiliser le laitier comme granulats de béton à fin de préserver notre environnement qui représente l'un des objectifs primordiaux de notre travail de Master.

Bibliographie

- [1] ACI 3R-87. 1994. Ground granulated blast-furnance slag as a cementitious constituent in concrete. ACI Manuel of concrete practice, part 1, materials and general properties of concrete. Detroit: Michigan
- [2] Bing C., Juanyu L., 2008. Experimental application of mineral admixtures in lightweight concrete with high strength and workability. *Construction and Building Materials* 22(4) 655–659
- [3] Mezghiche B., 1996. Résistance et déformabilité de Béton Basique. Premier séminaire national en génie civil Biskra, 8-9 Décembre
- [4] Dreux G., Festa J., 1995. Nouveau guide du béton. Edition Eyrollès. Paris
- [5] Cyr M., Mouret M., 2003. Rheological characterization of superplasticized cement pastes containing mineral admixtures: Consequences on SCC design, Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Berlin 20-23 October, 241-255
- [6] Shi and al. 1998. A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste, Transactions of the Japan Concrete Institute, 20, 9-14.
- [7] Toutou Z 2002, Rhéologie et formulation des géo suspensions concentrées : évaluation des conditions d'extrudabilité, thèse de doctorat de INSA- Rennes France
- [8] Chi JM., Yang CC. 2003. Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete. *Cement & concrete composites* 25(2) 197-205
- [9] Ke Y., Beaucour A.L., Ortola S., Dumontet H. Cabrillac. 2009. Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete. 23 (8) 2821-2828
- [10] Mouli M., Khelafi H., 2008 Performances characteristics of lightweight aggregate concrete containing natural pozzolan. *Building and environment* 43(1) 31-36
- [11] Toutou Z 2002, Rhéologie et formulation des géo suspensions concentrées : évaluation des conditions d'extrudabilité, thèse de doctorat de INSA- Rennes France
- [12] Zeghichi leila 2006, Etude des bétons basiques à base des différents granulats, thèse de doctorat de l'université Mohammed khider – biskra

[13]Chennit M1992, Béton expansé à base de laitier, thèse de Magister de L'ENP.

[14]Kriker A1992, Durabilité du béton à base de laitier, thèse de Magister de L'ENP.

Résumé

Les granulats occupent la première place parmi les matières premières qui composent le béton. La consommation des granulats naturels s'augmente avec l'augmentation de la quantité du béton. Considérant en fonction du développement durable, la confection du béton avec granulats recyclés du laitier devient une bonne solution au problème de développement harmonieux entre les ressources et l'environnement.

Mots clés : béton, granulats recyclés, laitier de haut fourneau, résistance mécanique.

Abstract:

The aggregates take the first place among the raw materials which form the concrete. The consumption of natural aggregates rises with the increase of the concrete's quantity. Considering, according the sustainable development, the preparation of concrete with the recycled aggregates of slag becomes a good solution of harmonious development between the resources and the environment.

Key words: concrete, recycled aggregates, slag of blast furnaces, mechanical resistance

الملخص:

تشغل الحصى مكانا مرموقا من بين المواد الأولية التي تشكل الخرسانة . و يرتفع استهلاك الحصى الطبيعية بارتفاع كمية الخرسانة . بالأخذ بعين الاعتبار و وفقا للتنمية المستدامة ، مزيج الخرسانة مع الفضلات المعاد تصنيعها، فتصبح بذلك حلا جيدا للتطوير المنسجم بين المصادر و البيئة.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة، الحصى المعاد تصنيعها، نفايات الفرن المنصهر، المقاومة الميكانيكية.

